

# Verjetnost in statistika - zapiski s predavanj

## prof. Drnovška

Tomaž Poljanšek

študijsko leto 2022/23

### Kazalo

0.1	Matematično upanje oz. pričakovana vrednost . . . . .	2
0.2	Disperzija, kovarianco in korelacijski koeficient . . . . .	8
0.3	Pogojna porazdelitev in pogojno matematično upanje . . . . .	12
0.4	Višji momenti in vrstilne karakteristike . . . . .	16
0.5	Rodovne funkcije . . . . .	18
0.6	Momentno rodovna funkcija . . . . .	21
0.7	Šibki in krepki zakon velikih števil . . . . .	24
0.8	Centralni limitni izrek . . . . .	26

**Posledica 0.1.** Če so  $X_1, X_2 \dots X_n$  neodvisne slučajne spremenljivke, porazdeljene  $N(0, 1)$ , potem je  $Y := X_1^2 + \dots + X_n^2$  porazdeljena po  $\chi^2(n)$

*Dokaz.* Vemo, da je  $X_i^2 \sim \chi^2(1)$  in da so  $X_1^2 \dots X_n^2$  neodvisne spremenljivke. Potem je po trditvi + indukciji  $Y \sim \chi^2(1 + \dots + 1) = \chi^2(n)$  ■

Oglejmo si transformacijo  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \rightarrow (u, v)$ , ki preslika zvezno porazdeljen slučajni vektor  $(x, y)$  v zvezno porazdeljen slučajni vektor  $(u, v)$ , torej  $U = u(x, y), V = v(x, y)$

Označimo še  $A_{u,v} = (-\infty, u] \times (-\infty, v]$

Potem je

$$F_{(U,V)}(u, v) = \iint_{A_{u,v}} p_{(U,V)}(s, t) ds dt$$

Pot drugi strani pa je

$$F_{(U,V)}(u, v) = P((U, V) \in A_{u,v}) = P((X, Y) \in f^{-1}(A_{u,v})) = \iint_{f^{-1}(A_{u,v})} p_{(X,Y)}(x, y) dx dy$$

Privzemimo še, da je  $f$  zvezno odvedljiva bijekcija. Potem je  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (u, v) \rightarrow (x, y)$  tudi zvezno odvedljiva. Z zamenjavo spremenljivk  $x = X(u, v), y = Y(u, v)$  v zadnjem intergalu dobimo

$$F_{(U,V)}(u, v) = \iint_{A_{u,v}} p_{(X,Y)}(x(s, t), y(s, t)) \cdot |J(s, t)| dx ds$$

kjer je

$$J(u, v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{bmatrix} (u, v)$$

Jacobijeva determinanta.

Zaradi imamo torej  $p_{(U,V)}(u, v) = p_{(X,Y)}(x(u, v), y(u, v)) |J(u, v)|$

Oglejmo si poseben primer

*Primer.*  $U = X, V = v(x, y)$  oz  $X = U, Y = y(u, v)$

Tedaj je  $p_{(U,V)}(u, v) = p_{(X,Y)}(u, y(u, v)) \left| \frac{\partial y}{\partial v}(u, v) \right|$

Gostota spremenljivke  $V$  je  $\int_{-\infty}^{\infty} p_{(X,Y)}(u, y(u, v)) \left| \frac{\partial y}{\partial v}(u, v) \right| dv = p_V(v)$

Pišimo  $Z = V$ , torej je  $Y = y(x, z)$ , saj je  $U = X$

Potem prepisemo  $p_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{(X,Y)}(u, y(x, z)) \left| \frac{\partial y}{\partial z}(x, z) \right| dx$

*Primer.*

1.  $Z = X + Y \implies Y = Z - X$ , torej je  $y(x, z) = z - x, \frac{\partial y}{\partial z}(x, z) = 1$

$$p_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{(X,Y)}(x, z-x) \cdot 1 dx$$

2.  $Z = X \cdot Y \implies Y = \frac{Z}{X}$ , torej je  $y(x, z) = \frac{z}{x}, \frac{\partial y}{\partial z}(x, z) = \frac{1}{x}$

$$p_{X \cdot Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{(X,Y)}(x, \frac{z}{x}) \frac{1}{|x|} dx$$

Če sta še  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki, potem je

$$p_{X \cdot Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_X(x) \cdot p_Y\left(\frac{z}{x}\right) \cdot \frac{1}{|x|} dx$$

## 0.1 Matematično upanje oz. pričakovana vrednost

V primeru  $X : \begin{pmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ p_1 & \cdots & p_n \end{pmatrix}$  je matematično upanje oz. pričakovana vrednost vsota  $E(X) := \sum_{k=1}^n x_k \cdot p_k$

V posebnem primeru  $p_1 = \cdots = p_n = \frac{1}{n}$  je  $E(X) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k = \frac{x_1 + \cdots + x_n}{n}$  - povprečje števil  $x_1 \cdots x_n$

expected value, expectation, mean value

Naj bo  $X$  diskretno porazdeljena slučajna spremenljivka z neskončno zalogo vrednosti:

$$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots \\ p_1 & p_2 & p_3 & \cdots \end{pmatrix}$$

$X$  ima matematično upanje oz. pričakovano vrednost, če je  $\sum_{k=1}^{\infty} |x_k| p_k < \infty$   
Tedad je matematično upanje definirano kot  $E(X) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k \cdot p_k$   
Naj bo sedaj  $X$  zvezno porazdeljena slučajna spremenljivka z gostoto  $p_X$ .  
Potem ima  $X$  matematično upanje, če je  $\int_{-\infty}^{\infty} |x| \cdot p_X(x) dx < \infty$ . Tedaje  
je matematično upanje slučajne spremenljivke  $X$  enako  $E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p_X(x) dx$

*Primer.*

$$1. X \sim Ber(p) \text{ oz. } X : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix} q = 1 - p, E(X) = 0 \cdot q + 1 \cdot p = p$$

$$2. X \sim Poi(\lambda), \text{ torej } p_k = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} k = 0, 1 \dots$$

$$E(X) = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot p_k = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} = e^{-\lambda} \cdot \lambda \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^{k-1}}{(k-1)!} = \lambda$$

$$3. \text{ Enakomerna porazdelitev na } [a, b]$$

$$p(X) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{če } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sicer} \end{cases}$$

$$E(X) = \int_a^b x \cdot \frac{1}{b-a} dx = \frac{1}{b-a} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_a^b = \frac{b^2 - a^2}{2(b-a)} = \frac{b+a}{2}$$

$$4. X \sim N(\mu, \sigma)$$

$$E(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{-\infty}{\infty} x \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx =$$

$$U = \frac{x - \mu}{\sigma} \implies du = \frac{dx}{\sigma}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\sigma u + \mu) e^{-\frac{1}{2}u^2} du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma \int_{-\infty}^{\infty} u \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du + \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} u \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du = \mu \quad (1)$$

Ker je v predzadnjem koraku 1. funkcija (v integralu) liha, 2. pa je gostota porazdelitve  $N(0, 1)$

$$5. \text{ Cauchyjeva porazdelitev } p(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}$$

$$\text{Nima matematičnega upanja, saj je } \int_{-\infty}^{\infty} |x| \cdot \frac{1}{\pi(1+x^2)} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x}{1+x^2} dx = \frac{1}{\pi} \ln(1+x^2) \Big|_0^{\infty} = \infty$$

6.  $1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \dots$  je pogojno konvergentna vrsta, t.j. konvergira, a ne absolutno

$$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots \end{pmatrix}, \sum_{k=1}^{\infty} x_k \cdot p_k = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k}$$

$$x_k \cdot p_k = \frac{(-1)^{k-1}}{k}$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} p_k = 1$$

$$p_k := \frac{1}{2^k} \text{ npr. ker je vsota } 1$$

$$x_k := \frac{(-1)^{k-1}}{k} = 2^k$$

Ta porazdelitev nima matematičnega upanja, ker vrsta ne konvergira absolutno

**Trditev 0.2.** Naj bo  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  zvezna funkcija

- (a) Če je  $X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots \end{pmatrix}$  potem je  $E(f \circ X) \equiv E(f(X)) = \sum_{k=1}^{\infty} f(x_k) \cdot p_k$  (če le to matematično upanje obstaja)
- (b) Če je  $X$  zvezno porazdeljena z gostoto  $p_X$ , potem je  $E(f \circ X) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot p_X(x) dx$

*Dokaz.* (samo (a)):

$$f \circ X : \begin{pmatrix} f(x_1) & f(x_2) & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots \end{pmatrix}$$

$$\text{npr če } f(x_1) = f(x_3) \implies \begin{pmatrix} f(x_1) & f(x_2) & \dots \\ p_1 + p_3 & p_2 & \dots \end{pmatrix}$$

$$(E(f \circ X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p_{f(x)}(x) dx = \dots = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot p_X(x) dx - \text{substitucija } y = f(x) \text{ v integralu}) \quad \blacksquare$$

**Posledica 0.3.** Slučajna spremenljivka  $X$  ima matematično upanje  $\iff X$  ima matematično upanje. Tedaj velja  $|E(X)| = E(|X|)$

*Dokaz.* (samo diskreten primer):

$$E(|X|) \stackrel{\text{trd. } f(x)=|x|}{=} \sum_i |x_i| \cdot p_i \geq \left| \sum_i x_i \cdot p_i \right| = |E(X)|$$

■

**Posledica 0.4.** Za  $\forall a \in \mathbb{R}$  in vsako slučajno spremenljivko  $X$  z matematičnim upanjem velja  $E(a \cdot X) = a \cdot E(X)$  (homogenost)

*Dokaz.*  $f(x) = a \cdot x$ , trditev (od prej) ■

Podobno kot zadnjo trditev se dokaže

**Trditev 0.5.** Naj bo  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  zvezna funkcija in  $(X, Y)$  slučajni vektor

- (a) Naj bo  $(X, Y)$  diskretno porazdeljen  $p_{ij} := P(X = x_i, Y = y_j)$ . Potem je  $E(f(X, Y)) = \sum_i \sum_j f(x_i, y_j) \cdot p_{ij}$  (če le vrsta (oz. končna vsota) absolutno konvergira)
- (b) Naj bo  $(X, Y)$  zvezno porazdeljen z gostoto  $p(X, Y)$ . Potem je  $E(f(X, Y)) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) p_{(X,Y)}(x, y) dy$  (če le integral absolutno konvergira)

**Posledica 0.6.** Če slučajni spremenljivki  $X$  in  $Y$  imata matematično upanje, potem ga ima tudi  $X + Y$  in velja  $E(X + Y) = E(X) + E(Y)$  (aditivnost)

*Dokaz.* (samo zvezen primer):

$$\begin{aligned} E(X, Y) &\stackrel{f(x,y)=x+y}{=} \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} (x + y) p_{(X,Y)}(x, y) dy = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x dx \int_{-\infty}^{\infty} p_{(X,Y)}(x, y) dy + \int_{-\infty}^{\infty} y dy \int_{-\infty}^{\infty} p_{(X,Y)}(x, y) dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x p_X(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} y p_Y(y) dy = E(X) + E(Y) \end{aligned}$$

■

**Posledica 0.7.** Za slučajne spremenljivke  $X_1 \cdots X_n$ , ki imajo matematično upanje, velja  $E(a_1 X_1 + \cdots + a_n X_n) = a_1 E(X_1) + \cdots + a_n E(X_n)$  z  $\forall a_1 \cdots a_n \in \mathbb{R}$

$$E(X + Y) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p_{X+Y}(x) dx \stackrel{?}{=} E(X) + E(Y) \text{ ni očitno iz tega}$$

*Primer.* 1. Če ima  $X$  matematično upanje, potem  $E(X - E(X)) = E(X) - E(E(X)) = E(X) - E(X) = 0$

2.  $X_k \sim \text{Ber}(p)$ , t.j.  $X_k \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}$ ,  $q = 1 - p$

$$X = X_1 + \cdots + X_n \implies E(X) = E(X_1) + \cdots + E(X_n) = n \cdot p$$

Posebej to (v 2. zgledu) velja v primeru, ko so  $\{X_k\}_{i=1}^n$  neodvisne. To velja tudi za Bernoullijevo zaporedje ponovitev poskusa: opazujemo dogodek A s  $P(A) = p$ .  $X$  je frekvenca dogodka A v  $n$  ponovitvah poskusa. Potem je  $X \sim \text{Bin}(n, p)$  in  $X = X_1 + \dots + X_n$ , kjer je  $(X_k = 1)$  dogodek, da se A zgodi v  $k$ -ti ponovitvi poskusa, sicer je  $(X_k = 0)$ . Po zgornjem je  $E(X) = n \cdot p$ . Do tega lahko pridemo tudi direktno:

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{k=0}^n k \cdot p_k = \sum_{k=0}^n k \cdot \binom{n}{k} p^k q^{n-k} = \\ &= \sum_{k=1}^n k \cdot \frac{n}{k} \binom{n-1}{k-1} p^k q^{n-k} = np \sum_{k=1}^n \binom{n-1}{k-1} p^{k-1} q^{n-k} \stackrel{j=k-1}{=} \\ &= np \left( \sum_{j=0}^{n-1} \binom{n-1}{j} p^j q^{n-1-j} \right) = np(p+q)^{n-1} = np \end{aligned}$$

**Trditev 0.8** (Cauchy-Schwartzova neenakost). Če obstajata  $E(X^2)$  in  $E(Y^2)$ , potem obstaja tudi  $E(X \cdot Y)$  in velja  $E(|X \cdot Y|) \leq \sqrt{E(X^2) \cdot E(Y^2)}$ . Enačaj velja samo v primeru  $|Y| = \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}} |X|$  z verjetnostjo 1

*Dokaz.* Ker za nenegativna realna števila velja neenakost

$$u \cdot v \leq \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \iff (u - v)^2 \geq 0$$

za nenegativni slučajni spremenljivki  $U$  in  $V$  velja neenakost

$$U \cdot V \leq \frac{1}{2}(U^2 + V^2)$$

Enakost velja samo v točkah  $\omega \in \Omega$ , za katere je  $U(\omega) = V(\omega)$

Če vstavimo  $U = a \cdot |X|$  in  $V = \frac{1}{a}|Y|$  za  $a > 0$ , dobimo  $|X \cdot Y| \leq \frac{1}{2}(a^2 Y^2 + \frac{1}{a^2} X^2)$  in zato je

$$E(|X \cdot Y|) \leq \frac{1}{2}(a^2 E(X^2) + \frac{1}{a^2} E(Y^2)) \text{ za } \forall a > 0 \quad (2)$$

Če vstavimo  $a^2 = \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}}$  na desni strani dobimo

$$\frac{1}{2}(\sqrt{E(Y^2) + E(X^2)} + \sqrt{E(X^2 + E(Y^2))}) = \sqrt{E(X^2) + E(Y^2)}$$

Torej je

$$E(|X \cdot Y|) \leq \sqrt{E(X^2) \cdot E(Y^2)}$$

Enakost v neenakosti velja  $\iff a|X| = \frac{1}{a}|Y|$ , torej  $|Y| = a^2|X| = \frac{E(Y^2)}{E(X^2)}|X|$  z verjetnostjo 1 ■

**Posledica 0.9.** Če obstaja  $E(X^2)$ , potem obstaja  $E(X)$  in velja  $(E(X))^2 \leq E(X^2)$

*Dokaz.*  $Y = 1$ , t.j.  $Y : \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$

$$E(|X \cdot 1|) \leq \sqrt{E(X^2) \cdot 1^2} \quad (E(|X|))^2 \leq E(X^2)$$

■

**Trditev 0.10.** Naj bosta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki, ki imata matematični upanji. Potem ima matematično upanje tudi  $X \cdot Y$  in velja  $E(X \cdot Y) = E(X) \cdot E(Y)$

*Dokaz.* (samo zvezem primer):

$$E(X \cdot Y) \stackrel{\text{trd}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot y \cdot p_{(X,Y)}(x,y) dx dy \stackrel{\text{neodvisnost}}{=} \iint_{\mathbb{R}} x \cdot y \cdot p_X(x) \cdot p_Y(y) dx dy = \int_{-\infty}^{\infty} x p_X(x) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y p_Y(y) dy = E(X) \cdot E(Y)$$

■

**Definicija 0.11** (Nekoreliranost). Slučajni spremenljivki  $X$  in  $Y$  sta nekorelirani, če velja  $E(X \cdot Y) = E(X) \cdot E(Y)$ , sicer sta korelirani.

Po trditvi iz neodvisnosti sledi nekoreliranost. Obratno pa ne velja:

*Primer.*

$$U = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\pi}{2} & \pi \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$X = \cos(U) : \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$Y = \sin(U) : \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$E(X) = 0, E(Y) = \frac{1}{3}$$

$$X \cdot Y = \sin(U) \cdot \cos(U) = 0 \Rightarrow E(X \cdot Y) = 0 \Rightarrow X \text{ in } Y \text{ sta nekorelirani slučajni spremenljivki}$$

X \ Y	0	1	Σ
-1	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
0	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
-1	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
Σ	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1

$$\Rightarrow \text{nista neodvisni, npr}$$

$$\frac{1}{3} = P(X = 1, Y = 0) \neq P(X = 1) \cdot P(Y = 0) = \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3}$$



**Trditev 0.12.**  $X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ p_1 & p_2 \end{pmatrix}, Y : \begin{pmatrix} y_1 & y_2 \\ q_1 & q_2 \end{pmatrix}$

Potem sta  $X$  in  $Y$  neodvisni  $\iff$  nekorelirani  
 $\iff E(X \cdot Y) = E(X) \cdot E(Y)$

## 0.2 Disperzija, kovarianco in korelacijski koeficient

**Definicija 0.13** (Disperzija). Naj obstaja  $E(X^2)$ . Disperzija oz. varianca slučajne spremenljivke  $X$  je  $D(X) \equiv \text{var}(X) := E((X - E(X))^2)$

Disperzija meri razpršenost slučajne spremenljivke  $X$  okoli  $E(X)$

Ker je  $E((X - E(X))^2) = E(X^2 - 2E(X)X + (E(X))^2) = E(X^2) - 2E(X)E(X) + (E(X))^2 = E(X^2) - (E(X))^2$ , je  $D(X) = E(X^2) - (E(X))^2$

Lastnosti disperzije:

- $D(X) \geq 0$  in  $D(X) = 0 \iff P(X = E(X)) = 1$ , t.j.  $X$  je izrojena slučajna spremenljivka
- $D(a \cdot X) = a^2 D(X)$   $a \in \mathbb{R}$
- $\forall a \in \mathbb{R}$  velja:  $E((X - a)^2) \geq D(X)$ . Enakost velja le v primeru  $a = E(X)$

*Dokaz.*

$$E((X - a)^2) = E(X^2 - 2aX + a^2) = E(X^2) - 2E(X)a + a^2 = (a - E(X))^2 + E(X^2) - (E(X))^2$$

Enakost velja samo za  $a = E(X)$  ■

**Definicija 0.14** (Standardna deviacija). Standardna deviacija ali standardni odklon slučajne spremenljivke  $X$  je  $\sigma(X) := \sqrt{D(X)}$

Zanjo velja  $\sigma(aX) = |a| \cdot \sigma(X)$  za  $\forall a \in \mathbb{R}$

Primeri nekaterih  $E(X)$  in  $D(X)$

1. enakomerna diskretna porazdelitev:  $\begin{pmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ \frac{1}{n} & \cdots & \frac{1}{n} \end{pmatrix}$

$$E(X) = \frac{x_1 + \cdots + x_n}{n}, D(X) = E(X^2) - (E(X))^2 = \frac{x_1^2 + \cdots + x_n^2}{n} - \left(\frac{x_1 + \cdots + x_n}{n}\right)^2$$

2. Binomska porazdelitev  $\text{Bin}(n, p)$ ,  $n \in \mathbb{N}, p \in (0, 1), q = 1 - p$

$$E(X) = n \cdot p, D(X) = npq, \sigma(X) = \sqrt{npq}$$

3. Poissonova porazdelitev  $Poi(\lambda), \lambda > 0$

$$E(X) = \lambda, D(X) = \lambda$$

4. Geometrijska porazdelitev  $geo(p), p \in (0, 1), q = 1 - p$

$$E(X) = \frac{1}{p}, D(X) = \frac{q}{p^2}$$

5. Pascalova porazdelitev  $Pas(m, p), m \in \mathbb{N}, p \in (0, 1)$

$$E(X) = \frac{m}{p}, D(X) = \frac{mq}{p^2}$$

6. Enakomerna zvezna porazdelitev  $Ed$  na  $[a, b]$

$$E(X) = \frac{a+b}{2}, D(X) = \frac{(b-a)^2}{12}$$

7. Normalna porazdelitev  $N(\mu, \sigma)$

$$E(X) = \mu, D(X) = \sigma^2, \sigma(X) = \sigma$$

8. Porazdelitev gama  $\gamma(b, c)$

$$E(X) = \frac{b}{c}, D(X) = \frac{b}{c^2}$$

9. Porazdelitev  $\chi^2(n) = \gamma(\frac{n}{2}, \frac{1}{2})$

$$E(X) = n, D(X) = 2n$$

10. Eksponentna porazdelitev  $Exp(\lambda), \lambda > 0 = \gamma(1, \lambda)$

$$E(X) = \frac{1}{\lambda}, D(X) = \frac{1}{\lambda^2}, \sigma(X) = \frac{1}{\lambda}$$

Preverimo, da je  $D(X) = \sigma^2$  za  $X \sim N(\mu, \sigma)$

$$D(X) = E((X - E(X))^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} dx$$

$$t = \frac{x - \mu}{\sigma} \implies x - \mu = \sigma t, dx = \sigma dt$$

$$= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 e^{-\frac{1}{2}t^2} dt =$$

$$u = t, dv = t \cdot e^{-\frac{1}{2}t^2}$$

$$du = dt, v = -e^{-\frac{1}{2}t^2}$$

$$\frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} (-te^{-\frac{1}{2}t^2} |_{-\infty}^{\infty}) + \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} (0 + \sqrt{2\pi}) = \sigma^2$$

**Definicija 0.15** (Kovarianca). Kovarianca slučajnih spremenljivk  $K(X, Y) \equiv \text{Cov}(X, Y) := E((X - E(X))(Y - E(Y)))$

Ker je

$$E((X - E(X))(Y - E(Y))) = E(XY - E(Y)X - E(X)Y + E(X)E(Y)) = E(XY) - E(X)E(Y) - E(X)E(Y) + E(X)E(Y)$$

je  $\text{cov}(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y)$

Lastnosti:

1.  $K(X, X) = D(X)$
2.  $K(X, Y) = 0 \iff X$  in  $Y$  sta neodvisni
3.  $K$  je simetrična in bilinearna funkcija:
  - $K(X, Y) = K(Y, X)$
  - $K(aX + bY, Z) = aK(X, Z) + bK(Y, Z) \forall a, b \in \mathbb{R}$
4. Če obstajata  $D(X)$  in  $D(Y)$ , potem obstaja tudi  $K(X, Y)$ . Tedaj velja  $|K(X, Y)| \leq \sqrt{D(X) \cdot D(Y)} = \sigma(X) \cdot \sigma(Y)$   
 To sledi iz Cauchy-Schwartzove neenakosti ( $|E(U \cdot V)| \leq \sqrt{E(U^2) \cdot E(V^2)}$ ) za slučajni spremenljivki  $X - E(X)$  in  $Y - E(Y)$ . Enačaja v neenakosti velja  $\iff Y - E(Y) \pm \frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - E(X))$  z verjetnostjo 1
5. Če  $X$  in  $Y$  imata disperziji, potem jo ima tudi  $X + Y$  in velja  $D(X + Y) = D(X) + D(Y) + 2K(X, Y)$   
 če sta  $X$  in  $Y$  nekorelirani (posebej neodvisni), potem je  $D(X + Y) = D(X) + D(Y)$

*Dokaz.* Sledi iz enakosti

$$(X + Y - E(X + Y))^2 = ((X - E(X)) + (Y - E(Y)))^2 = (X - E(X))^2 + (Y - E(Y))^2 + 2(X - E(X))(Y - E(Y))$$

$$D(X + Y) = E((X - E(X))^2) + E((Y - E(Y))^2) + E(2(X - E(X))(Y - E(Y))) = D(X) + D(Y)$$

■

6. Posplošitev:  $D(X_1 + \dots + X_n) = D(X_1) + \dots + D(X_n) + 2 \sum_{i < j} K(X_i, X_j)$   
 Če so  $X_1 \dots X_n$  paroma nekorelirani (posebej neodvisni), potem je  
 $D(X_1 + \dots + X_n) = D(X_1) + \dots + D(X_n)$

*Primer.*  $\text{Bin}(n, p)$  je vsota  $X = X_1 + \dots + X_n$ , kjer je  $X_i \sim \text{Ber}(p)$ , t.j.

$X_i \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}$ , ki so neodvisne

Zato je  $D(X) = D(X_1 + \dots + X_n) = n \cdot D(X_1) = n \cdot p \cdot q$ , saj je  $D(X_n) = E(X_n^2) - (E(X_n))^2 = p - p^2 = pq$

**Definicija 0.16** (Standardizacija slučajne spremenljivke). Standardizacija slučajne spremenljivke  $X$  je slučajna spremenljivka  $X_s = \frac{X - E(X)}{\sigma(X)}$

Zanjo velja:

- $E(X_s) = 0$
- $D(X_s) = \frac{1}{\sigma(X)^2} \cdot D(X - E(X)) = \frac{1}{\sigma(X)^2} D(X) = 1$

*Primer.*

$$X \sim N(\mu, \sigma) \implies X_s = \frac{X - E(X)}{\sigma(X)} = \frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1)$$

**Definicija 0.17** (Korelacijski koeficient). Korelacijski koeficient slučajnih spremenljivk  $X$  in  $Y$  je

$$r(X, Y) = \frac{K(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} = \frac{E((X - E(X))(Y - E(Y)))}{\sigma(X)\sigma(Y)} = E(X_s \cdot Y_s)$$

Lastnosti:

1.  $r(X, Y) = 0 \iff X$  in  $Y$  sta nekorelirani
2.  $r(X, Y) \in [-1, 1]$ , kar sledi iz lastnosti (4) za kovarianco
3. •  $r(X, Y) = 1 \iff Y = \frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - E(X)) + E(Y)$  z verjetnostjo 1

- $r(X, Y) = -1 \iff Y = -\frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - E(X)) + E(Y)$  z verjetnostjo 1

Tedaj imamo linearno zvezo med  $X$  in  $Y$

*Primer.*

$$(X, Y) \sim N(\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y, \rho) \quad \mu_x, \mu_y \in \mathbb{R}, \sigma_x, \sigma_y \in [0, \infty], \rho \in [-1, 1]$$

Trdimo, da je  $r(X, Y) = \rho$

$$(X_s, Y_s) \sim N(0, 0, 1, 1, \rho)$$

$$r(X, Y) = E(X_s \cdot Y_s) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \iint_{\mathbb{R}} xy e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}(x^2-2\rho xy+y^2)} dx dy$$

$$\begin{aligned} x^2 - 2\rho xy + y^2 &= (x - \rho y)^2 + (1 - \rho^2)y^2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} y e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho^2)}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}(x-\rho y)^2} dx = \\ &= E(N(\rho y, \sqrt{1-\rho^2})), \text{ ker je } p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} = \\ &= \rho \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} y^2 e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} y^2 e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = D(N(0, 1)) = 1\right) \implies = \rho \end{aligned}$$

Torej sta  $X$  in  $Y$  nekorelirani  $\overset{\text{v splošnem}}{\iff} \rho = 0 \overset{\text{ta primer}}{\iff} X, Y$  neodvisni

Kakšna je gostota, če je  $\rho$  blizu 1?  $\rho \uparrow 1 : \rho \downarrow -1 :$

gostota je skoraj skoncentrirana na neki premici, torej med  $X$  in  $Y$  obstaja skoraj linearna zveza

### 0.3 Pogojna porazdelitev in pogojno matematično upanje

Izberimo si dogodek  $B$  s  $P(B) > 0$

**Definicija 0.18.** Pogojna porazdelitvena funkcija slučajne spremenljivke  $X$  glede na  $B$  je  $F_X(X | B) := P(X \leq x | B) = \frac{P(X \leq x \wedge B)}{P(B)}$

Ima enake lastnosti kot porazdelitvena funkcija

#### A Diskreten primer

Naj bo  $(X, Y)$  diskretno porazdeljen slučajni vektor z verjetnostno funkcijo  $p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j), i, j = 1, 2, \dots$

Za pogoj B vzemimo  $B = (Y = y_j)$  pri nekem  $j$ , torej  $q_j = P(Y = y_j)$ . Potem je pogojna porazdelitvena funkcija slučajne spremenljivke  $X$  glede na  $Y = y_j$   $F_X(X | Y = y_j) := \frac{P(X \leq x | Y = y_j)}{P(Y = y_j)} = \frac{1}{q_j} \sum_{j: x_j \leq x} p_{ij}$

Če vpeljemo pogojno verjetnostno funkcije  $p_{i|j} = P(X = x_i | Y = y_j) = \frac{p_{ij}}{q_j}$ ,  $F_X(X | Y = y_j) = \sum_{i: x_i \leq x} p_{i|j}$

Pogojno matematično upanje slučajne spremenljivke  $X$  glede na  $Y = y_j$  je matematično upanje te porazdelitve:

$$E(X | Y = y_j) := \sum_i x_i \cdot p_{i|j} = \frac{1}{q_j} \sum_i x_i \cdot p_{ij}$$

Regresijska funkcija  $\ell(y_j) = E(X | Y = y_j)$ , ki je definirana na zalogi vrednoti slučajne spremenljivke  $Y$

Definirajmo novo slučajno spremenljivko  $E(X | Y) = \ell(y)$ , ki ji rečemo pogojno matematično upanje slučajne spremenljivke  $X$  glede na slučajno spremenljivko  $Y$

$$\text{Ta ima shemo } E(X | Y) = \begin{pmatrix} \ell(y_1) & \ell(y_2) & \dots \\ q_1 & q_2 & \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(X | Y = y_1) & \dots \\ q_1 & \dots \end{pmatrix}$$

Zanjo velja

$$E(X | Y) = \sum_j \ell(y_j) \cdot q_j = \sum_j \sum_i x_i \cdot p_{ij} = \sum_i x_i (\sum_j p_{ij}) = \sum_i x_i \cdot p_i = E(X)$$

kjer je  $p_i = P(X = x_i)$

Kaj dobimo, če sta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki?

Tedaj je  $p_{i|j} = \frac{p_{ij}}{q_j} = \frac{p_i \cdot q_j}{q_j} = p_i$  in  $\ell(y_j) = E(E(X | Y = y_j)) = \sum_i x_i \cdot p_{i|j} = \sum_i x_i \cdot p_i = E(X)$ , torej je regresijska funkcija kar konstanta  $E(X)$  oz. je  $E(X | Y)$  izrojena slučajna spremenljivka z vrednostjo  $E(X)$

*Primer.* Kokoš znese  $N$  jajc, kjer je  $N \sim Poi(\lambda)$  z  $\lambda > 0$ . Iz vsakega jajca se z verjetnostjo  $p \in (0, 1)$  izvali piščanec, neodvisno od drugih jajc. Naj bo  $K$  število piščancev. Določimo  $E(K | N)$ ,  $E(K)$  in  $E(N | K)$

$$P(N = n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$P(K = k | N = n) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \quad k = 0, 1, \dots, n$$

$$\ell(n) = E(K \mid N = n) = E(\text{Bin}(n, p)) = n \cdot p$$

torej je  $E(K \mid N) = \ell(n) = p \cdot N$

$$E(K \mid N) = \begin{pmatrix} p \cdot 0 & p \cdot 1 & p \cdot 2 & \dots \\ P(N=0) & P(N=1) & P(N=2) & \dots \end{pmatrix}$$

$$E(K) = E(E(K \mid N)) = E(p \cdot N) = p \cdot E(N) = p \cdot \lambda$$

$$\begin{aligned} P(K = k) &= \sum_{n=k}^{\infty} P(K = k \mid N = n) \cdot P(N = n) = \sum_{n=k}^{\infty} \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k} \cdot \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} = \\ &= \frac{1}{k!} e^{-\lambda} p^k \lambda^k \sum_{n=k}^{\infty} \frac{(qk)^{n-k}}{(n-k)!} = \frac{(p\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} e^{q\lambda} = \frac{(p\lambda)^k}{k!} e^{-p\lambda} \quad k = 0, 1, \dots, n \end{aligned}$$

Torej je  $K \sim \text{Poi}(p \cdot \lambda)$

$$\begin{aligned} P(N = n \mid K = k) &= \frac{P(N = n, K = k)}{P(K = k)} = \frac{P(K = k \mid N = n) \cdot P(N = n)}{P(K = k)} = \\ &= \frac{n! p^k q^{n-k}}{k!(n-k)!} \cdot \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \cdot \frac{pk! e^{p\lambda}}{(p\lambda)^k} = \frac{(q\lambda)^{n-k}}{(n-k)!} \cdot e^{-q\lambda} \quad n = k, k+1, \dots \end{aligned}$$

To je za  $k$  premaknjena Poissonova porazdelitev:  $k + \text{Poi}(q\lambda)$

Potem je  $\psi(k) = E(N \mid K = k) = E(k + \text{Poi}(q\lambda)) = k + q \cdot \lambda$  in zato

je  $E(N \mid K) = \psi(k) = k \cdot q + \lambda$

Preizkus:  $E(E(N \mid K)) = E(k + q \cdot \lambda) = p\lambda + q\lambda = \lambda = E(N)$  (ok)

Regresijsko premico je vpeljal Golten (1822-1911)

## B Zvezni primer

Naj bo  $(X, Y)$  zvezno porazdeljen slučajni vektor z gostoto  $p_{(X,Y)}(x, y)$ .

Vzemimo  $B = (y < Y \leq y + k)$  za nek  $y \in \mathbb{R}, k > 0$ .

Potem je  $F_X(X \mid y < Y \leq y + k) = P(x \leq x \mid y < Y \leq y + k) = \frac{P(X \leq x, y < Y \leq y + k)}{P(y < Y \leq y + k)} = \frac{F_{(X,Y)}(x, y+k) - F_{(X,Y)}(x, y)}{F_Y(y+k) - F_Y(y)}$

Pogojna porazdelitvena funkcija slučajne spremenljivke  $X$  glede na dogodek  $(Y = y)$  je limita, če obstaja:

$$F_X(x \mid Y = y) = \lim_{h \downarrow 0} F_X(x \mid y < Y \leq y+h) = \lim_{h \downarrow 0} \frac{F_{(X,Y)}(x, y+h) - F_{(X,Y)}(x, y)}{F_Y(y+h) - F_Y(y)}$$

Denimo sedaj, da sta  $p_{X,Y}$  in  $p_Y$  zvezni funkciji. Tedaj je  $F_X(X \mid Y =$

$$y) = \frac{\frac{\partial}{\partial y} F_{(X,Y)}(x, y)}{p_Y(y)} = \frac{1}{p_Y(y)} \int_{-\infty}^x p_{(X,Y)}(x, v) dv$$

Če vpeljemo pogojno gostoto  $p_X(x \mid Y = y) := \frac{p_{(X,Y)}(x, y)}{p_Y(y)}$ , je torej

$$F_{(X,Y)}(x \mid Y = y) = \int_{-\infty}^x p_X(u \mid y) du$$

Pogojno matematično upanje slučajne spremenljivke  $X$  glede na dogodek ( $Y = y$ ) je

$$E(X | Y = y) := \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p_X(x|y)dx = \frac{1}{p_Y(y)} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} xp_{(X,Y)}(x, y)dx$$

Vpeljimo regresijsko funkcijo  $l(y) := E(X | Y = y)$ , definirano na zalogi vrednosti slučajne spremenljivke  $Y$ . Tako dobimo novo slučajno spremenljivko  $E(X | Y) := l(y)$ : pogojno matematično upanje slučajne spremenljivke  $X$  glede na slučajno spremenljivko  $Y$ .

Kot v diskretnem primeru se pokaže enakost  $E(E(X | Y)) = E(X)$

*Primer.*  $(X, Y) \sim N(\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y, \rho)$

Robna gostota za  $Y$  je  $N(\mu_y, \sigma_y)$

Zato je pogojna gostota

$$p_X(x | y) = \frac{p_{(X,Y)}(x, y)}{p_Y(y)} \stackrel{\text{D.N.}}{=} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{(2\pi)(1 - \rho^2)}} \exp\left(-\frac{1}{2(1 - \rho^2)}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} - \rho \frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right)$$

torej je  $N(\mu_x + \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y - \mu_y), \sigma_x \sqrt{1 - \rho^2})$

Eksponent:  $\frac{1}{2(1 - \rho^2)} \sigma_x^2 (x - (\mu_x + \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y - \mu_y)))^2$

$\implies l(y) = E(X | Y = y) = \mu_x + \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y - \mu_y)$  - 1. parameter

$= \alpha + \beta y : \beta = \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y}, \alpha = \mu_x - \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot \mu_y$

Torej je  $E(x | y) = \alpha + \beta y$

*Primer.* Meritev onesnaženosti zraka

Slučajna spremenljivka  $X$  meri koncentracijo ogljikovih delcev (v  $\mu g/m^3$ ),

$Y$  pa koncentracijo ozona (v  $\mu l/l = ppm$ )

Podatki kažejo, da ima  $(X, Y)$  približno dvorazsežno normalno porazdelitev,  $\mu_x = 10.7, \sigma_x^2 = 29, \mu_y = 0.1, \sigma_y^2 = 0.02, \rho = 0.72$

Koncentracija ozona je škodljiva zdravju, če je  $\geq 0.3$

Denimo, da naprava za merjenje ozona odpove, koncentracija škodljivih delcev je  $X = 200$

a kolikšna je pričakovana koncentracija ozona?

b kolikšna je verjetnost, da je stopnja ozona zdravju škodljiva

a

$$E(Y | X = x) = \mu_y + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x - \mu_x) = 0.1 + 0.72 \sqrt{\frac{0.02}{29}}(20 - 10.7) \doteq 0.28$$

b Pogojna porazdelitev  $Y | X = x$  je  $N(\mu_y + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x - \mu_x), \sigma_y \sqrt{1 - \rho^2}) = N(0.28, 0.1)$



$$P(Y > 0.3 \mid X = 20) = 1 - P(Y \leq 0.3 \mid X = 20) = 1 - F_{N(0,1)}\left(\frac{0.3 - 0.28}{0.1}\right) \doteq 0.42$$

## 0.4 Višji momenti in vrstilne karakteristike

**Definicija 0.19** (Momenti). Naj bo  $k \in \mathbb{N}$  in  $a \in \mathbb{R}$ . Moment reda  $k$  glede na točko  $a$  je  $m_k(a) := E((X - a)^k)$  (če obstaja)

Za  $a$  običajno vzamemo

1.  $a = 0$ :  $z_k := m_k(0) = E(X^k)$  začetni moment reda  $k$
2.  $a = E(X)$ :  $m_k := m_k(E(X))$  cenralni moment reda  $k$

Očitno je  $z_1 = E(X)$ ,  $m_2 = D(X)$

**Trditev 0.20.** Če  $\exists m_n(a)$ , potem obstajaj tudi moment  $m_k(a)$  za vse  $k < n$

*Dokaz.* (V zveznem primeru):

$$\begin{aligned} E((X-a)^k) &= \int_{-\infty}^{\infty} (x-a)^k p_X(x) dx = \int a - 1^{a+1} (X-a)^k p_X(x) dx + \int_{(-\infty, a-1) \cup (a+1, \infty)} (x-a)^k p_X(x) dx \\ &\leq \int_{-\infty}^{\infty} p_X(x) dx + \int_{(-\infty, a-1) \cup (a+1, \infty)} (x-a)^k p_X(x) dx \leq \\ &\leq 1 + E((X-a)^k) < \infty \end{aligned}$$

■

**Trditev 0.21.** Če obstaja zacetni moment  $z_n$ , potem obstaja  $m_n(a)$  glede na poljubno točko  $a \in \mathbb{R}$

*Dokaz.*

$$E((X-a)^n) \leq E((|X| + |a|)^n) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} E(a)^{n-k} \cdot E(|X|^k) < \infty$$

■

Centralne momente lahko izrazimo z začetnimi:

$$\begin{aligned} m_n(a) &= E((X-a)^n) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-a)^{n-k} E(X^k) \\ a = E(X) &\implies m_k = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-1)^{n-k} z_1^{n-k} z_k \end{aligned}$$

Asimetrija slučajne spremenljivke  $X$  je  $A(X) := E(X_s^3) = E\left(\left(\frac{X-E(X)}{\sigma_x}\right)^3\right) = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$   $m_2 = \sigma^2 = D(X)$

$A(N(\mu, \sigma)) = 0$ , ker  $A(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^3 e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$

Sploščenost (kurtozis)  $K(X) := E(X_s^4) = \frac{m_4}{m_2^2}$

$K(N(\mu, \sigma)) = 3$

Ce momenti ne obstajajo (npr. že  $E(X)$  ne), potem si lahko pomagamo z vrstilnimi karakteristikami

**Definicija 0.22** (Mediana). Mediana slučajne spremenljivke  $X$  je vsaka vrednost  $x \in \mathbb{R}$ , za katero velja  $P(X \leq x) \leq \frac{1}{2}$  in  $P(X \geq x) \leq \frac{1}{2}$  (in  $P(X < x) = 1 - F(x-)$ )

Če je  $F$  porazdelitvena funkcija za  $X$ , je to ekvivalentno s pogojem  $F(x-) \leq \frac{1}{2} \leq F(x)$

Če je  $X$  zvezno porazdeljena slučajna spremenljivka, dobimo  $F(X) = \frac{1}{2}$  oz.  $\int_{-\infty}^{\infty} p(t) dx = \frac{1}{2}$

Te vrednosti (lahko jih je več) označimo z  $X_{\frac{1}{2}}$

*Primer.*

- $X \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{4}{5} \end{pmatrix}$   
 $x_{\frac{1}{2}} = 1, E(X) = \frac{4}{5}$

- $X : \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{2}{4} \end{pmatrix}$   
Mediane so  $[0, 1]$

- 

- $X \sim N(0, 1)$   
 $x_{\frac{1}{2}} = \mu = E(X)$

**Definicija 0.23** (Kvantil). Kvantil reda  $p$  ( $p \in (0, 1)$ ) je vsaka vrednost  $x_p$ , za katero velja  $P(X \leq x_p) \geq p$  in  $P(X \geq x_p) \geq 1 - p$   
Ekvivalentno je  $F(x_p-) \leq p \leq F(x_p)$

Če je  $X$  zvezno porazdeljena, je pogoj  $F(x_p) = p$  t.j.  $\int_{-\infty}^{\infty} p(t) dt = p$

- Kvartili:  $X_{\frac{1}{4}}, X_{\frac{2}{4}}, X_{\frac{3}{4}}$
- Percentili:  $X_{\frac{1}{100}}, X_{\frac{2}{100}}, \dots, X_{\frac{99}{100}}$

*Primer.* Telesna višina odraslih moških

**Definicija 0.24** ((Semiinter)kvartilni razmik).  $s := \frac{1}{2}(x_{\frac{3}{4}} - x_{\frac{1}{4}})$

je nadomestek (analog) za standardno deviacijo

*Primer.*

- $X \sim N(0, 1)$

$$x_{\frac{1}{2}} = 0$$

$$\int_{-\infty}^{\frac{1}{4}} p(t) dt = \frac{1}{4} \xrightarrow{\text{tabelca}} x_{\frac{1}{4}} \doteq -0.67$$

$$\xrightarrow{\text{simetrija}} x_{\frac{3}{4}} \doteq 0.67 \implies s = 0.67, \sigma(x) = 1$$

- $X$  naj ima Cauchyjevo porazdelitev

$$p(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}$$

$$x_{\frac{1}{2}} = 0$$

Momenti ne obstajajo

$$\int_{-\infty}^{x_{\frac{1}{4}}} \frac{1}{\pi} \frac{1}{1+x^2} dx = \frac{1}{4}$$

$$\frac{1}{\pi} \arctan x \Big|_{x=-\infty}^{x_{\frac{1}{4}}} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{1}{\pi} \arctan x_{\frac{1}{4}} + \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

$$\arctan x_{\frac{1}{4}} = \frac{1}{4} \implies x_{\frac{1}{4}} = -1$$

$$\xrightarrow{\text{simetrija}} x_{\frac{3}{4}} = 1, s = 1$$

## 0.5 Rodovne funkcije

**Definicija 0.25.** Naj bo  $X$  slučajna spremenljivka z vrednostmi v  $\mathbb{N} \cup \{0\}$  :

$$p_k = P(X = k) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad p_k \geq 0, \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$$

Rodovna funkcija slučajne spremenljivke  $X$  je

$$G_X(s) = p_0 + p_1 s + p_2 s^2 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} p_k \dots s^k$$

za  $\forall s \in \mathbb{R}$ , za katere vrsta absolutno konvergira.

Očitno je  $G_X(0) = p_0, G_X(1) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$

Ker je  $s^X : \begin{pmatrix} s^0 & s^1 & s^2 & \dots \\ p_0 & p_1 & p_2 & \dots \end{pmatrix}$ , je  $G_X(s) = E(s^X)$

Za  $s \in [-1, 1]$  velja  $|p_k \cdot s^k| \leq P_k$  in  $\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$ . Zato je vrsta konvergentna, če je  $|s| \leq 1$ . Torej je konvergenčni radij vrste vsaj 1

*Primer.*

- $X \sim \text{geo}(p)$ ,  $p \in (0, 1)$

$$\begin{aligned} p_k &= P(X = k) = p \cdot q^{k-1} \quad k = 1, 2, 3, \dots \\ G_X(s) &= \sum_{k=1}^{\infty} p \cdot q^{k-1} s^k = ps \sum_{k=0}^{\infty} (qs)^{k-1} \\ &= ps \frac{1}{1 - qs} \end{aligned}$$

konvergira, ko  $|qs| < 1 \Leftrightarrow |s| < \frac{1}{|q|} =: R$

- $p_k = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$

$$\begin{aligned} G_X(s) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} s^k = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda s)^k}{k!} = \\ &= e^{-\lambda} \cdot e^{\lambda s} = e^{\lambda(s-1)} \end{aligned}$$

$$R = \infty \quad \forall s \in \mathbb{R}$$

Iz teorije Taylorjevih vrst sledi

**Izrek 0.26** (O eniličnosti). Naj imata  $X$  in  $Y$  rodovni funkciji  $G_X$  in  $G_Y$ . Potem je  $G_X(s) = G_Y(s)$  za  $\forall s \in [-1, 1] \Leftrightarrow P(X = k) = P(Y = k)$  za vse  $k = 0, 1, 2, \dots$

Tedaj velja  $P(X = k) = \frac{1}{k!} G_X^k(0)$

$$G_X(s) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k s^k, \quad p_k = P(X = k)$$

Naj ima rodovna funkcija  $G_X$  slučajne spremenljivke  $X$  konvergenčni radij  $R > 1$ . Potem za  $\forall s \in (-R, R)$  velja  $G'_X(s) = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_k s^{k-1}$

Če postavimo  $s = 1$ , dobimo  $G'(1) = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_k = E(X)$

**Izrek 0.27.** Naj ima  $X$  rodovno funkcijo  $G_X(s)$  in naj bo  $n \in \mathbb{N}$ . Potem je

$$G_X^n(1-) \equiv \lim_{s \nearrow 1} G_X^n(s) = E(X(X-1)(X-2) \cdots (X-n+1))$$

*Dokaz.* Za  $\forall s \in [0, 1]$  je  $G_X^n(s) = \sum_{k=n}^{\infty} k(k-1)(k-2) \cdots (k-n+1) p_k s^{k-n+1} =$

$$= E(X(X-1)(X-2) \cdots (X-n+1) \cdot s^{X-n})$$

Ko gre  $s \uparrow 1$ , z uporabo Abelove leme dobimo

$$\lim_{s \nearrow 1} G_X^n(s) = \lim_{s \nearrow 1} \sum_{k=n}^{\infty} k(k-1) \cdot (k-n+1) =$$

$$\stackrel{\text{Abelova lema}}{=} \sum_{k=n}^{\infty} \lim_{s \nearrow 1} k(k-1) \cdot (k-n+1) = \sum_{k=n}^{\infty} k(k-1) \cdot (k-n+1) p_k = E(X(X-1) \cdots (X-n+1))$$

■

**Posledica 0.28.**

$$E(X) = G_X'(1-)$$

$$D(X) = E(X^2) - (E(X))^2 = E(X(X-1)) + E(X) - (E(X))^2 = G_X^{(2)}(1-) + G_X^{(1)}(1) - (G_X^{(1)}(1-))^2$$

**Izrek 0.29.** Naj bosta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki z rodovnicama funkcijama  $G_X$  in  $G_Y$ . Potem je  $G_{X+Y}(s) = G_X(s) \cdot G_Y(s)$  za  $s \in [-1, 1]$

*Dokaz.*  $G_{X+Y}(s) = E(s^{X+Y}) = E(s^X \cdot s^Y) \stackrel{\text{izrek}}{=} E(s^X) \cdot E(s^Y) = G_X(s) \cdot G_Y(s)$ , saj sta  $s^X$  in  $s^Y$  neodvisni slučajni spremenljivki ■

*Posplošitev 0.30.* Če so  $X_1, X_2, \dots, X_n$  neodvisne slučajne spremenljivke, potem je za vse  $s \in [-1, 1]$   $G_{X_1+\dots+X_n}(s) = G_{X_1}(s) \cdots G_{X_n}(s)$ . Če so  $X_1, X_2, \dots, X_n$  enako porazdeljene in neodvisne, potem je

$$G_{X_1+\dots+X_n}(s) = (G_X(s))^n$$

**Izrek 0.31.** Naj bodo za  $\forall n \in \mathbb{N}$  slučajne spremenljivke  $N, X_1, X_2, \dots, X_n$  neodvisne. Naj ima  $N$  rodovno funkcijo  $G_N$ ,  $X_n$  pa rodovno funkcijo  $G_X$ . Potem ima slučajna spremenljivka  $S := X_1 + X_2 + \dots + X_n$  rodovno funkcijo enako  $G_S = G_N \circ G_X$  oz.  $G_S(s) = G_N(G_X(s))$  za  $s \in [-1, 1]$

To je posplošitev formule dd:  $P(N = n) = 1, G_N(s) = 1 \cdot s^n = s^n$

*Dokaz.* Zaradi neodvisnosti imamo  $P(S = k) = \sum_{n=0}^{\infty} P(S = k, N = n) =$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} P(N = n, X_1 + \dots + X_n = k) \stackrel{\text{neodvisnost}}{=} \sum_{n=0}^{\infty} P(N = n) \cdot P(X_1 + \dots + X_n = k)$$

Zato je

$$G_S(s) = \sum_{k=0}^{\infty} P(S = k) \cdot s^k = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n) \cdot P(X_1 + \dots + X_n = k) \cdot s^k =$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=1}^{\infty} P(N=n) \left( \sum_{k=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_n = k) \cdot s^k \right) = \\
&= \sum_{n=1}^{\infty} P(N=n) \cdot (G_X(s))^n = G_N(G_X(s))
\end{aligned}$$

za vse  $s \in [-1, 1]$  ■

**Posledica 0.32.** Pri predpostavkah iz izreka velja Waldova enakost:

$$E(S) = E(N) \cdot E(X)$$

*Dokaz.*

$$G_S(s) = G_N(G_X(s)) \forall s \in [-1, 1] \quad (3)$$

$$E(S) = G'_s(1-) = G'_N(G_X(1-)) \cdot G'_X(1-) = E(N) \cdot E(X) \quad (4)$$
■

*Primer.* Kokoš, jajca, piščanci

N jajc,  $N \sim Poi(\lambda)$

K je število piščancev

Definiramo  $X_i = 1$  dogodek, da se iz i-tega jajca izvali piščanec, sicer  $X_i = 0$ .

Potem je  $X_i : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}$ ,  $q = 1 - p$  in  $X_i$  so neodvisne slučajne spremenljivke.

Očitno je  $K = X_1 + X_2 + \dots + X_n$

Ker je  $G_N(s) = e^{\lambda(s-1)}$  in  $G_X(s) = q \cdot s^0 + p \cdot s = q + ps$ , je po izreku  $G_K(s) = G_N(G_X(s)) = e^{\lambda(q+ps-1)} = e^{\lambda(ps-p)} = e^{\lambda p(s-1)} \forall s \in [-1, 1]$ , zato je  $K \sim Poi(\lambda p)$

## 0.6 Momentno rodovna funkcija

**Definicija 0.33** (Momentno rodovna funkcija). Momentno rodovna funkcija je  $M_X(t) = E(e^{tX})$  za  $t \in \mathbb{R}$ , za katere obstaja matematično upanje

V primeru zvezne porazdelitve je  $M_X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} p_X(x) dx$

To je Laplaceova transformacija funkcije  $p_X$

V diskretnem primeru  $X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots \end{pmatrix}$  je  $M_X(t) = \sum_i e^{tx} p_i$

V posebnem primeru, ko ima X nenegative celoštevilске vrednosti, je  $M_X(t) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{it} p_i =$

$$= \sum_{i=0}^{\infty} p_i (e^t)^i = G_X(e^t) \quad (M_X(t) = E((e^t)^X) = G_X(e^t))$$

$$G_X(s) = E(s^X)$$

Očitno je  $M_X(0) = E(e^0) = E(1) = 1$

*Primer.*

$$\begin{aligned} X &\sim N(0, 1) \\ M_X(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-t)^2}{2}} dx \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} = \\ &= e^{-\frac{t^2}{2}} \forall t \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

ker je  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-t)^2}{2}} dx$  gostota za  $N(0, 1)$

**Izrek 0.34.** Naj bo  $M_X(t) < \infty$  (obstaja,  $< \infty$  zato, ker je  $e^t > 0$ ) za  $\forall t \in (-\delta, \delta)$  pri nekem  $\delta > 0$ . Potem je porazdelitev za  $X$  natanko določena z  $M_X$ , vsi začetni momenti obstajajo,  $z_k = E(X^k) = M_X^k(0)$  za  $\forall k \in \mathbb{N}$  in velja  $M_X(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z_k}{k!} t^k$  za  $\forall t \in (-\delta, \delta)$

*Dokaz.* (bistvo)

$$\begin{aligned} M_X(t) &= E(e^{t \cdot X}) = E\left(\sum_{k=0}^{\infty} t^k \frac{X^k}{k!}\right) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{E(X^k)}{k!} t^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z_k}{k!} t^k \end{aligned}$$

■

**Trditev 0.35.**  $M_{aX+b}(t) = e^{bt} M_X(at)$ ,  $a \neq 0, b \in \mathbb{R}$

*Dokaz.*  $M_{aX+b}(t) = E(e^{t(aX+b)}) = E(e^{(at)X} \cdot e^{bt}) = e^{bt} M_X(at)$

■

**Izrek 0.36.** Če sta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki, potem je  $M_{X+Y}(t) = M_X(t) \cdot M_Y(t)$

*Dokaz.*  $M_{X+Y}(t) = E(e^{t(X+Y)}) = E(e^{tX} \cdot e^{tY}) \stackrel{e^{tX}, e^{tY} \text{ neodvisni}}{=} E(e^{tX}) \cdot E(e^{tY}) = M_X(t) \cdot M_Y(t)$

■

**Trditev 0.37.** Naj bosta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki in  $X \sim N(\mu_x, \sigma_x)$ ,  $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y)$ . Potem je  $X + Y \sim N(\mu_x + \mu_y, \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2})$

*Dokaz.* Ker je

$$U := \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} = \frac{X - E(X)}{\sigma(X)} \sim N(0, 1)$$

(standardizacija), je

$$X = \sigma_x \cdot U + \mu_x$$

in zato je

$$M_X(t) = e^{\mu_x t} \cdot M_U(\sigma_x t)$$

po zadnji trditvi. Potem je

$$M_U(t) = e^{\frac{t^2}{2}}$$

je

$$M_X(t) = e^{\mu_x t} \cdot e^{\frac{\sigma_x^2 t^2}{2}} = e^{\frac{\sigma_x^2 t^2}{2} + \mu_x t} \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

za  $Y$  velja podobno. Po zadnjem izreku je

$$\begin{aligned} M_{X+Y}(t) &= M_X(t) \cdot M_Y(t) = e^{\frac{\sigma_x^2 t^2}{2} + \mu_x t} \cdot e^{\frac{\sigma_y^2 t^2}{2} + \mu_y t} = \\ &= e^{\frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)t^2}{2} + (\mu_x + \mu_y)t} \end{aligned}$$

Po izreku je

$$X + Y \sim N(\mu_x + \mu_y, \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2})$$

■

*Opomba.* Če bi vedeli, da je  $X + Y$  porazdeljena normalno, bi “samo” izračunali parametra

*Primer.*

$$X \sim N(0, 1), M_X(t) = e^{\frac{t^2}{2}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\frac{t^2}{2})^k}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2^k \cdot k!} t^{2k}$$

Po drugi strani je  $M_X(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{z_j}{j!} t^j \quad \forall t \in \mathbb{R}$

Primerjamo koeficiente:

- lihi koeficienti:  $z_{2k-1} = 0 \quad k \in \mathbb{N}$
- sodi koeficienti:

$$\begin{aligned} \frac{z_{2k}}{(2k)!} &= \frac{1}{k! 2^k} \implies z_{2k} = \frac{(2k)!}{k! 2^k} = \\ &= \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k)}{2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2k)} = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2k-1) = (2k-1)!! \quad k \in \mathbb{N} \end{aligned}$$



## 0.7 Šibki in krepki zakon velikih števil

**Definicija 0.38** (Verjetnostna konvergenca). Zaporedje slučajnih spremenljivk  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  verjetnostno konvergira proti slučajni spremenljivki  $X$ , če za  $\forall \epsilon > 0$  velja  $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - X| \geq \epsilon) = 0$  oz.  $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - X| < \epsilon) = 1$

**Definicija 0.39** (Skoraj gotova konvergenca). Zaporedje slučajnih spremenljivk  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  skoraj gotovo konvergira proti slučajni spremenljivki  $X$ , če velja  $P(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = X) = 1$

Tukaj je  $(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = X) = \{\omega \in \Omega : \lim_{n \rightarrow \infty} X_n(\omega) = X(\omega)\} =$

$$= \{\omega \in \Omega : \forall k (\in \mathbb{N}) \exists m \in \mathbb{N} \forall n \geq m : |X_n(\omega) - X(\omega)| < \frac{1}{k}\} =$$

$$= \{\cap_{k \in \mathbb{N}} \cup_{m \in \mathbb{N}} \cap_{n \geq m} \omega \in \Omega : |X_n(\omega) - X(\omega)| < \frac{1}{k}\} \quad (5)$$

*Opomba.* Števne unije in preseki  $\implies$  smo v  $\sigma$ -algebri, torej je to res dogodek

**Trditev 0.40.** Če  $X_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} X$  skoraj gotovo, potem za  $\forall \epsilon > 0 \lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - X| < \epsilon \text{ za } n \geq m) = 1$

*Dokaz.* Označimo  $c_m := (|X_n - X| < \epsilon \text{ za } n \geq m) = \cap_{n=m}^{\infty} (|x_n - X| < \epsilon)$ .

Potem je  $c_1 \subseteq c_2 \subseteq \dots$

je  $c_m$  za  $\epsilon = \frac{1}{k}$  in  $(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = X) \subseteq \cup_{n=1}^{\infty} c_m$  (preseki)

Torej je  $1 = P(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = X) \subseteq (\cup_{m=1}^{\infty} c_m) = \lim_{m \rightarrow \infty} P(c_m)$

Od tod sledi  $\lim_{m \rightarrow \infty} P(c_m) = 1$  ■

**Posledica 0.41.** Če  $X_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} X$  skoraj gotovo, potem  $X_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} X$  verjetnostno konvergira.

*Dokaz.* Izberemo  $\epsilon > 0$ . Potem velja

$$P(|X_n - X| < \epsilon \text{ za } \forall n \geq m) \leq P(|X_m - X| < \epsilon)$$

Če uporabimo trditev, dobimo  $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - X| < \epsilon) = 1$  (leva stran). ■

*Opomba.* Obratna implikacija ne velja

**Definicija 0.42.** Naj bo  $X_1, X_2, X_3 \dots$  zaporedje slučajnih spremenljivk, ki imajo matematično upanje. Definirajmo  $Y_n = \frac{S_n - E(S_n)}{n} = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} - \frac{E(X_1) + \dots + E(X_n)}{n}$

Potem je  $E(Y_n) = 0$

Za  $\{Y_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  velja šibki zakon velikih števil (ŠZVŠ), kadar  $Y_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$  verjetnostno, torej za  $\forall \epsilon > 0 \lim_{n \rightarrow \infty} (|y| < \epsilon) = 1 = \lim_{n \rightarrow \infty} (|\frac{S_n - E(S_n)}{n}| < \epsilon)$  Za  $\{Y_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  velja krepki zakon velikih števil (KZVŠ), kadar  $Y_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$  skoraj gotovo, torej  $P(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n - E(S_n)}{n} = 0) = 1$

Če velja KVZŠ, potem velja ŠVZŠ

*Primer.* Mečemo kocko,  $X_k$  je # pik v k-tem metu. Potem je  $E(X_k) = \frac{7}{2}$  in  $Y_n = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} - \frac{7}{2}$

Ali konvergira  $\frac{X_1 + \dots + X_n}{n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{7}{2}$  skoraj gotovo? (Da)

**Izrek 0.43.**

a Neenakost Markova: če slučajna spremenljivka  $X$  ima matematično upanje, potem je  $P(|X| \geq a) \leq \frac{E(|X|)}{a}$  za  $\forall a > 0$

b Neenakost Čebiševa: če slučajna spremenljivka  $X$  ima disperzijo, potem je  $P(|X - E(X)| \geq a \cdot \sigma(x)) \leq \frac{1}{a^2}$  za  $\forall a > 0$  (pomembno za  $a \geq 1$ , ker je verjetnost  $\leq 1$ )

oz. če pišemo  $\epsilon = a \cdot \sigma(x) \implies P(|X - E(X)| \geq \epsilon) \leq \frac{D(X)}{\epsilon^2}$  za  $\forall \epsilon > 0$

*Dokaz.* (samo zvezni primer)

a

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} |x| p_x(x) dx \geq \int_{\{|x| \geq a\}} |x| p_x(x) dx \geq$$

$$|a| \int_{\{|x| \geq a\}} p_x(x) dx = a \cdot P(|X| \geq a)$$

b

$$P((X - E(X)) \geq \epsilon) = P((X - E(X))^2 \geq \epsilon^2) \stackrel{(a) \text{ za } X - E(X)}{\leq} \frac{E((X - E(X))^2)}{\epsilon^2} = \frac{D(X)}{\epsilon^2}$$

■

**Izrek 0.44** (Markov). Če za zaporedje slučajnih spremenljivk  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  velja  $\frac{D(S_n)}{n^2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ , potem velja ŠZVŠ. Tukaj je  $S_n := X_1 + \dots + X_n$

*Dokaz.* V neenakosti Čebiševa vzamemo  $X = \frac{S_n}{n}$

$$P\left(\frac{|S_n - E(S_n)|}{n} \geq \epsilon\right) \leq \frac{P(S_n)}{n^2 \epsilon^2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Če vzamemo  $Y_n = \frac{|S_n - E(S_n)|}{n}$ , je  $P(|Y_n| \geq \epsilon) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$

oz.  $P(|Y_n| < \epsilon) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$

Zato  $Y_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$  verjetnostno, torej velja ŠZVŠ za zaporedje  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  ■

**Posledica 0.45** (Izrek Čebišev). Če so  $X_1, X_2, \dots, X_n$  paroma nekorelirane slučajne spremenljivke in  $\sup_{n \in \mathbb{N}} D(X_n) < \infty$ , potem za  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  velja ŠVZŠ

*Dokaz.* Ker je  $D(S_n) = D(X_1) + \dots + D(X_n) \leq n \cdot c$ , je  $\frac{D(S_n)}{n^2} \leq \frac{n \cdot c}{n^2} = \frac{c}{n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ , zato po izreku Markova velja ŠZVŠ ■

*Primer.*  $X_n : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}$  neodvisne slučajne spremenljivke,  $D(X_n) = pq$ ,  $E(X_n) = p$ ,  $E(S_n) = n \cdot p$

Po izreku Čebiševa velja ŠZVŠ:  $P\left(\frac{|S_n - E(S_n)|}{n} \geq \epsilon\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$

$$\implies P\left(\left|\frac{S_n}{n} - p\right| \geq \epsilon\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

$S_n$  je frekvenca dogodka,  $\frac{S_n}{n}$  je relativna frekvenca,  $\frac{S_n}{n} = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} p$  verjetnostno

To je Bernoullijev zakon velikih števil iz 1713

**Izrek 0.46** (Kolmogorov). Če za neodvisne slučajne spremenljivke  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  velja  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_n}{n^2} < \infty$ , potem velja KZVŠ, t.j.  $P(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n - E(S_n)}{n} = 0) = 1$ . Posebej je pogoj za vrsto izpolnjen, če je  $\sup_n D(X_n) < \infty$

*Primer.*  $X_n : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}$  neodvisne slučajne spremenljivke,  $D(X_n) = pq$

Po izreku Kolmogorova velja KVZŠ, t.j.  $\frac{S_n}{n} = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} p$  skoraj gotovo. To splošuje Bernoullijev zakon

## 0.8 Centralni limitni izrek

**Definicija 0.47.** Naj bo  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  zaporedje slučajnih spremenljivk s končnimi disperzijami. Definiramo  $S_n := X_1 + \dots + X_n$  in standardizirajmo:  $Z_n = \frac{S_n - E(S_n)}{\sigma(S_n)}$ , torej  $E(Z_n) = 0$ ,  $D(Z_n) = 1$

Za  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  velja centralni limitni izrek, če je  $F_{Z_n}(x) = P(Z_n \leq x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} F_{N(0,1)} \forall x \in \mathbb{R}$ , t.j.

$$P\left(\frac{S_n - E(S_n)}{\sigma(S_n)} \leq x\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dx \text{ za } \forall x \in \mathbb{R}$$

Pracimo, da  $\{Z_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  po porazdelitvi konvergira proti standardizirani normalni porazdelitvi.

**Izrek 0.48** (Centralni limitni izrek (CLI, osnovna verzija)). Naj bodo  $X_1, X_2 \dots$  neodvisne in enako porazdeljene slučajne spremenljivke. Potem zanje velja centralni limitni zakon, t.j.

$$P\left(\frac{S_n - E(S_n)}{\sigma(S_n)} \leq x\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dx \text{ za } \forall x \in \mathbb{R}$$

Dokazal je Ljapunov (1900), s tem je posplošil Laplaceov izrek iz leta 1812. V dokazu bomo uporabili

**Izrek 0.49** (O zveznosti rodovne funkcije). Naj za zaporedje  $\{Z_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  slučajnih spremenljivk velja:

$M_{Z_n}(t) \rightarrow M_{N(0,1)}(t) = e^{\frac{t^2}{2}}$  za vse  $t \in (-\delta, \delta)$  pri nekem  $\delta > 0$   
Potem  $F_{Z_n}(x) \rightarrow F_{N(0,1)}(x)$  za  $\forall x \in \mathbb{R}$

*Dokaz.* CLI v primeru, ko  $X_n$  imajo momentno rodovno funkcijo

$M_X(t) = E(e^{tX_n})$  na neki okolici točke 0

Naj bo  $E(X_n) = \mu$ ,  $D(X_n) = \sigma^2$  in  $U_n := X_n - \mu = X_n - E(X_n)$ . Torej je  $E(U_n) = 0$  in  $D(U_n) = \sigma^2$  ter  $M_U(t) = 1 + tE(U_n) + \frac{t^2}{2!}E(U_n^2) + o(t^2) = 1 + \frac{t^2}{2}\sigma^2 + o(t^2)$  ( $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{o(n)}{n} = 0$ )

Ker je  $D(S_n) \stackrel{\text{neodvisne}}{=} D(X_1) + \dots + D(X_n) = n \cdot \sigma^2$  in  $E(S_n) = n \cdot \mu = E(X_1) + \dots + E(X_n)$ , je  $Z_n = \frac{S_n - E(S_n)}{\sigma(S_n)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} (\sum_{i=0}^n U_i)$

Potem je  $M_{Z_n}(t) = E(e^{tZ_n}) = E(e^{\frac{t}{\sigma\sqrt{n}}(U_1 + \dots + U_n)}) = E(e^{\frac{t}{\sigma\sqrt{n}}U_1}) \dots E(e^{\frac{t}{\sigma\sqrt{n}}U_n}) = \stackrel{\text{enaki}}{=} (M_U(\frac{t}{\sigma\sqrt{n}}))^n = (1 + \frac{t^2}{2n} + o(\frac{1}{n}))^n$   
 $\xrightarrow{n \rightarrow \infty \equiv o(\frac{1}{n} \rightarrow 0)} e^{\frac{t^2}{2}}$

**Lema 0.50.** Če  $X_n \rightarrow X$ , potem  $(1 + \frac{X_n}{n})^n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} e^x$

Po prejšnjem izreku:  $F_{Z_n}(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} F_{N(0,1)}(x)$  ■