

Gimnazija „Bora Stanković“  
Niš, Srbija

# MATURSKI RAD

Predmet: Matematika

Tema: Logaritam  
*jednačine i nejednačine*

Učenik:  
Luka Nešić, IV/6

Profesor:  
Nenad Totić

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>3</b>
1.1	Definicija logaritma . . . . .	3
1.2	Tok i grafik funkcije . . . . .	3
1.3	Antilogaritam . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Logaritamske jednakosti</b>	<b>4</b>
2.1	Logaritam stepena osnove . . . . .	4
2.2	Logaritam proizvoda . . . . .	4
2.3	Logaritam količnika . . . . .	4
2.4	Logaritam stepena broja . . . . .	5
2.5	Promena osnove logaritma . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Najčešće logaritamske osnove</b>	<b>6</b>
3.1	Osnova 10 . . . . .	6
3.2	Osnova 2 . . . . .	6
3.3	Osnova $e$ . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Brojna vrednost logaritma</b>	<b>8</b>
4.1	Formula . . . . .	8
4.2	Verižni razlomak . . . . .	8
4.3	Logaritamske tablice . . . . .	9
4.4	Logaritmar . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Razno</b>	<b>10</b>
5.1	Kompleksni logaritam . . . . .	10
5.2	Izvod . . . . .	11
5.3	Limes . . . . .	11
5.4	Benfordov zakon . . . . .	11
5.5	Teorema prostih brojeva . . . . .	11
5.6	Kvaternioni . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Zadaci i rešenja</b>	<b>13</b>
6.1	Jednačine . . . . .	13
6.1.1	FIT . . . . .	13
6.1.2	Jednačina 2 . . . . .	13
6.1.3	Jjjj (yafe) . . . . .	14
6.1.4	Četiri četvorke . . . . .	14
6.1.5	Sveska 7 . . . . .	15
6.1.6	Beskonačni koren . . . . .	15
6.1.7	Net 3 . . . . .	16
6.1.8	Izumiranje . . . . .	16
6.2	Nejednačine . . . . .	17
6.2.1	Sveska 11 . . . . .	17
6.2.2	Sveska 9 . . . . .	17
6.2.3	Sveska 10 . . . . .	18
6.2.4	Net 1 . . . . .	18

6.2.5	Net 2 . . . . .	19
6.2.6	Net 6 . . . . .	20
6.2.7	Granice . . . . .	21
6.3	Kratki primeri . . . . .	22
6.3.1	Zemljotres . . . . .	22
6.3.2	Decimalne cifre . . . . .	22
6.3.3	Poluraspad joda . . . . .	22
6.3.4	Geometrijski niz . . . . .	22
6.3.5	Izvod . . . . .	23
6.3.6	$i$ na $i$ . . . . .	23
6.3.7	$\ln(-z)$ . . . . .	23
6.3.8	Prvo, pa 1 . . . . .	23
6.4	Ručni rad . . . . .	24
6.4.1	Analogni stepen . . . . .	24
6.4.2	Analogni kvadratni koren . . . . .	24
6.4.3	$\ln 3$ . . . . .	25
<b>A</b>	<b>Reference</b>	<b>26</b>
A.1	Literatura . . . . .	26
A.2	Software . . . . .	26
A.3	Linkovi . . . . .	27

# 1 Uvod

Ovaj rad se bavi *logaritamskom funkcijom*, jednom od najvažnijih funkcija u matematici. Zbog svoje važnosti, zajedno sa eksponencijalnom, trigonometrijskim i njima inverznim funkcijama, spada u grupu *elementarnih* funkcija. Opisane su njene osobine i dati su primeri njene upotrebe, kao i zadaci sa rešenjima (ukupno 26).

Sama reč *logaritam* potiče od grčkih reči  $\lambda\acute{o}\gamma\omicron\varsigma$  (*logos*) i  $\alpha\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma$  (*arimos*), sa značenjem „broj kojim se računa“.

## 1.1 Definicija logaritma

Funkcija

$$y = \log_b x \quad (1)$$

je rešenje po  $y$  jednačine

$$x = b^y,$$

gde je  $b$  *osnova* (*baza*) logaritma, a  $x$  *argument*. (Izgovara se „ $y$  je jednako logaritam od  $x$  za osnovu  $b$ “ ili kraće „ $y$  je logaritam  $b$  od  $x$ “.)

## 1.2 Tok i grafik funkcije

Funkcija je u skupu realnih brojeva  $\mathbb{R}$  definisana za  $x > 0$  i  $b > 0 \wedge b \neq 1$ . Funkcija je *monotona*: za  $b > 1$  funkcija je *rastuća*, dok je za  $b < 1$  funkcija *opadajuća*. Zbog toga važi *bijekcija*:  $\log_b u = \log_b v \Leftrightarrow u = v$ . Funkcija ima jednu *nulu*, uvek za  $x = 1$ .



Slika 1: Grafik logaritamske funkcije  $y = \log_b x$ .

## 1.3 Antilogaritam

Inverzna funkcija logaritmu je obično stepenovanje osnove logaritma argumentom i zove se *antilogaritam*

$$\text{antilog}_b x = \log_b^{-1} x = b^x. \quad (2)$$

Iz same definicije važi

$$\log_b(\text{antilog}_b x) = \text{antilog}_b(\log_b x) = x. \quad (3)$$

## 2 Logaritamske jednakosti

Za logaritamsku funkciju važe razne *jednakosti* koje se koriste za uprošćivanje i prilagođavanje izraza prilikom rešavanja problema i zadataka.

### 2.1 Logaritam stepena osnove

Po samoj definiciji logaritma, ako je  $x = b^a$ , onda je

$$\log_b b^a = a. \quad (4)$$

Ako stavimo da je  $1 = b^0$ , odnosno,  $b = b^1$ , dobijamo da je

$$\log_b 1 = 0 \quad \text{i} \quad \log_b b = 1. \quad (5)$$

Takođe je bitna jednakost

$$b^{\log_b x} = x \quad (6)$$

koja proizilazi iz same definicije logaritma i antilogaritma.

### 2.2 Logaritam proizvoda

Ako je

$$u = \log_b x \wedge v = \log_b y \Rightarrow x = b^u \wedge y = b^v,$$

onda je, zbog jednakosti (4)

$$x \cdot y = b^u b^v = b^{u+v} \Rightarrow \log_b(x \cdot y) = \log_b b^{u+v} = u + v.$$

Odavde je

$$\log_b(x \cdot y) = \log_b x + \log_b y. \quad (7)$$

Iz ove jednakosti se može izvesti formula za logaritam faktorijela broja. Ako je

$$n! = \prod_{k=1}^n k \Rightarrow \log(n!) = \sum_{k=1}^n \log k.$$

(Zanimljivo je da je  $\log(1 \cdot 2 \cdot 3) = \log(1 + 2 + 3) = \log 1 + \log 2 + \log 3$ .)

### 2.3 Logaritam količnika

Slično logaritmu proizvoda, ako je

$$u = \log_b x \wedge v = \log_b y \Rightarrow x = b^u \wedge y = b^v,$$

onda je, zbog jednakosti (4)

$$x/y = b^u b^{-v} = b^{u-v} \Rightarrow \log_b(x/y) = \log_b b^{u-v} = u - v.$$

Odavde je

$$\log_b(x/y) = \log_b x - \log_b y. \quad (8)$$

Iz ove jednakosti sledi

$$\log_b(1/x) = -\log_b x. \quad (9)$$

## 2.4 Logaritam stepena broja

Ako je

$$y = x^n = \underbrace{x \cdot x \cdots x}_{n \text{ puta}},$$

onda, iz jednakosti za logaritam proizvoda (7), sledi da je

$$\log_b y = \log_b (\underbrace{x \cdot x \cdots x}_{n \text{ puta}}) = \underbrace{\log_b x + \log_b x + \cdots + \log_b x}_{n \text{ puta}} = n \log_b x,$$

odakle je

$$\log_b x^n = n \log_b x. \quad (10)$$

Iz ove jednakosti sledi jednakost

$$\log_b \sqrt[n]{x} = \frac{1}{n} \log_b x, \quad (11)$$

kao i jednakost

$$x^y = b^{y \log_b x}. \quad (12)$$

## 2.5 Promena osnove logaritma

Ako je

$$y = \log_a x \Rightarrow x = a^y,$$

onda je

$$\log_b x = \log_b a^y = y \log_b a = \log_a x \cdot \log_b a.$$

Odavde je

$$\log_a x = \frac{\log_b x}{\log_b a}. \quad (13)$$

Iz ove jednakosti, ako stavimo da je  $x = b$ , se dobija i jednakost

$$\log_a b \cdot \log_b a = 1. \quad (14)$$

Iz jednakosti (4) i (13), ako stavimo da je  $a = b^n$ , sledi jednakost

$$\log_{b^n} x = \frac{1}{n} \log_b x. \quad (15)$$

Odavde, ako stavimo da je  $n = -1$ , sledi

$$\log_{1/b} x = -\log_b x, \quad (16)$$

a uzevši u obzir i jednakost (9) dobija se

$$\log_{1/b} x = \log_b(1/x). \quad (17)$$

 Treba biti oprezan kod korišćenja svih ovih jednakosti, naročito kod stepenovanja, i uvek treba proveriti interval u kome se računa. Na primer, iz jednakosti (10), sledi  $\log x^2 = 2 \log x$ , što je ispravno za  $x > 0$ , međutim,  $\log x^2 = 2 \log |x|$ , za bilo koje  $x \neq 0$ .

## 3 Najčešće logaritamske osnove

### 3.1 Osnova 10

U inženjerstvu se najčešće koristi logaritam sa osnovom 10, zove se *dekadni* ili *zajednički* logaritam, i piše se

$$y = \log_{10} x$$

ili, skraćeno,

$$y = \lg x.$$

Ponekad se može videti i samo

$$y = \log x,$$

bez navođenja osnove, ali treba obratiti pažnju na kontekst. Ako je neki inženjerski tekst u pitanju, najverovatnije se misli na osnovu 10.

Dekadni logaritam je pogodan i kada se koristi, takozvani *naučni* ili *inženjerski* zapis broja. Na primer, *Plankova konstanta* (Max Planck) iznosi

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J/Hz}$$

koja ima dekadni logatiram

$$\log_{10} h = \log_{10}(6,62607015) - 34.$$

U fizici se za merenje nivoa signala ili zvuka koristi jedinica *bel* (B), ali je češće u praktičnoj upotrebi 10 puta manja jedinica *decibel* (dB), odnosno,  $1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$ . Nivo signala  $L$ , koji zavisi od odnosa izmerene snage  $P$  i refrentne snage  $P_0$ , izražen u decibelima iznosi

$$L = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \text{ dB}.$$

Kako se u akustici uzima da je referentna snaga  $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ , moglo bi se pisati da je nivo zvuka u decibelima

$$L = 10 \log_{10}(P) - 120.$$

Normalan govor je oko 50 dB, zvuk motora mlaznog aviona pri poletanju je 150 dB, a smrtonosan je zvuk od 240 dB i više. Zvučni top Genasys LRAD ima nivo zvuka od oko 160 dB, što znači da je  $10^{11}$  puta moćniji od govora.

Slična formula se koristi i za određivanje jačine zemljotresa, ili pH vrednosti.

### 3.2 Osnova 2

U informatici se često koristi logaritam sa osnovom 2, koji se zove *binarni* logaritam, i piše se

$$y = \log_2 x$$

ili, skraćeno,

$$y = \lg x.$$

Koristi se u kombinatorici, kao i u određivanju *količine informacija*, odnosno, potrebnog broja bitova memorije za smeštanje nekog podatka. Ako se zna da će u memoriju biti upisivani celi brojevi od 0 do  $n$ , onda je potrebno rezevisati

$$bits = \lfloor \log_2(n) \rfloor + 1 \tag{18}$$

bitova memorije, gde  $\lfloor x \rfloor$  predstavlja *najveći ceo broj koji je manji ili jednak  $x$*  (izgovara se „najveće celo od  $x$ “). Na primer, ako će u određenoj memoriji najveći broj biti milion, onda je za to potrebno rezervisati

$$bits = \lfloor \log_2(1\,000\,000) \rfloor + 1 = \lfloor 19,9315685693 \rfloor + 1 = 19 + 1 = 20$$

bitova memorije. Najveći broj koji može stati u ovih rezervisanih 20 bitova memorije je binarni broj koji ima 20 jedinica i iznosi

$$(1111\,1111\,1111\,1111\,1111)_2 = 2^{20} - 1 = 1\,048\,575.$$

Kako su i realni brojevi u memoriji predstavljeni kao uređeni parovi binarnih brojeva u obliku (*mantisa*, *eksponent*), sa značenjem

$$x = mantisa \times 2^{eksponent},$$

binarni logaritam bi bio izračunat kao

$$\log_2(x) = \log_2(mantisa) + eksponent,$$

ako je *mantisa*  $> 0$ , inače je nedefinisan.

Binarni logaritam se koristi i u atomskoj fizici. Vreme *poluraspada*  $t_{1/2}$  je vreme potrebno da se raspadne polovina jezgara atoma neke materije. Ako imamo početan broj jezgara  $N_0$  i broj jezgara  $N_t$  nakon vremena  $t$ , njihov odnos se može predstaviti formulom

$$\frac{N_0}{N_t} = 2^{t/t_{1/2}} \Rightarrow \frac{t}{t_{1/2}} = \log_2 \left( \frac{N_0}{N_t} \right). \quad (19)$$

Ova formula se koristi i za određivanje starosti stena ili fosila.

### 3.3 Osnova e

Ovu logaritamsku osnovu je otkrio Jakob Bernuli (Jacob Bernoulli) kada je proučavao *složenu kamatu* i dokazao da *kontinualna* složena kamata teži konstanti

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n,$$

ali je tek Ojler (Leonhard Euler) odredio njenu tačnu vrednosti i dao joj ime. Logaritam za ovu osnovu se zove *prirodni* logaritam (*logarithmus naturalis*) i piše se

$$\ln x = \log_e x.$$

Antilogaritam je *eksponencijalna* funkcija  $e^x = \exp(x)$ , koja je poznata po tome što je to jedina funkcija čiji je prvi izvod jednak samoj funkciji;  $\exp'(x) = \exp(x)$ . Brojna vrednost se može izračunati formulom

$$e^x = \exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}. \quad (20)$$

Ako stavimo da je  $x = 1$ , brojna vrednost osnove prirodnog logaritma  $e$  se može odrediti

$$\begin{aligned} e &= \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} + \dots \\ &= 2,7182818284\,5904523536\,0287471352\,6624977572 \dots \end{aligned} \quad (21)$$

sa željenom tačnošću.



## 4 Brojna vrednost logaritma

### 4.1 Formula

Brojna vrednost prirodnog logaritma može biti izračunata pomoću formule

$$\ln x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{2n+1} \left( \frac{x-1}{x+1} \right)^{2n+1} \quad (22)$$

do željene tačnosti. Postupak kojim se računa  $y = \ln x$  sa tačnošću  $\varepsilon$  izgleda ovako:

$$\begin{array}{l} r \leftarrow (x-1)/(x+1); \quad k \leftarrow 1; \quad p \leftarrow 2r; \quad q \leftarrow r^2; \quad a \leftarrow p; \quad y \leftarrow a; \\ \text{ponavljati dok je } |a| > \varepsilon: \\ \quad k \leftarrow k+2; \quad p \leftarrow p \cdot q; \quad a \leftarrow p/k; \quad y \leftarrow y + a; \end{array} \quad (23)$$

Na ovaj način se može izračunati vrednost

$$\begin{aligned} \ln 2 &= \frac{2}{1 \cdot 3^1} + \frac{2}{3 \cdot 3^3} + \frac{2}{5 \cdot 3^5} + \frac{2}{7 \cdot 3^7} + \frac{2}{9 \cdot 3^9} + \dots \\ &= 0,6931471805 \, 5994530941 \, 7232121458 \, 1765680755 \, \dots \end{aligned} \quad (24)$$

kao i vrednost

$$\begin{aligned} \ln 10 &= \frac{2}{1 \cdot 9^1} + \frac{2}{3 \cdot 9^3} + \frac{2}{5 \cdot 9^5} + \frac{2}{7 \cdot 9^7} + \frac{2}{9 \cdot 9^9} + \dots + 3 \ln 2 \\ &= 2,3025850929 \, 9404568401 \, 7991454684 \, 3642076011 \, \dots \end{aligned} \quad (25)$$

(Videti zadatak 6.4.3 na strani 25.) Pomoću njih se mogu izračunati brojne vrednosti binarnog  $\log_2 x = \ln x / \ln 2$ , odnosno, dekadnog  $\log_{10} x = \ln x / \ln 10$  logaritma.

### 4.2 Verižni razlomak

Brojna vrednost prirodnog logaritma može se izračunati i pomoću *verižnog razlomka*

$$\begin{aligned} \ln(1+x) &= \frac{x}{1 + \frac{1^2 x}{2 - 1x + \frac{2^2 x}{3 - 2x + \frac{3^2 x}{4 - 3x + \dots}}}} \\ &= \frac{x}{1 + \prod_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 x}{n+1 - nx}}. \end{aligned} \quad (26)$$

Poput simbola koji se koriste za sumu ‘ $\Sigma$ ’ ili proizvod ‘ $\Pi$ ’, Gaus (Johann Carl Friedrich Gauß) je smislio, verovatno, najpogodniji način za predstavljanje verižnih (*lančanih*) razlomaka, gde simbol ‘K’ potiče od nemačke reči za *prekinuti lanac* (*Kettenbruch*). Izraz iza ovog simbola pokazuje kako izgleda *opšti član* verižnog razlomka.

Ako pomoću ove formule izračunamo prvih 11 *konvergenata*  $\ln 2$  kao  $-\ln(1+x)$ , gde je  $x = -1/2$ , dobićemo

$$\ln 2 \approx \frac{1}{2}, \frac{5}{8}, \frac{2}{3}, \frac{131}{192}, \frac{661}{960}, \frac{1327}{1920}, \frac{1163}{1680}, \frac{148969}{215040}, \frac{447047}{645120}, \frac{44711}{64512}, \frac{983705}{1419264}, \dots$$

gde je poslednji razlomak tačan na 5 decimala.

### 4.3 Logaritamske tablice

Prve tablice logaritama je 1614. godine izračunao škotski matematičar Neper (John Napier of Merchiston), koje su praktično sadržale logaritam za osnovu  $1/e$ , sa skaliranim argumentom i rezultatom, iako sam Neper nije znao za konstantu  $e$ . Savremenim zapisom bi ovaj logaritam bio definisan kao

$$\text{NapLog}(x) = 10^7 \log_{1/e}(x/10^7) = -10^7 \ln(x/10^7).$$

Nekoliko godina kasnije, 1617. i 1624, engleski matematičar Briggs (Henry Briggs) je izračunao tablice dekadnih logaritama sa 14 cifara tačnosti, koje se uz dopune i ispravke koriste i danas pod imenom *Brigsove tablice*.

### 4.4 Logaritmar

Pre pojave digitrona, za približno određivanje brojne vrednosti logaritma, koristila se je analogna mehanička sprava sa nekoliko lenjira zvana *logaritmar*.



Slika 2: Šiber.

Lenjiri imaju podeoke sa decimalom i logaritamskom, a često i sa sinusnom i nekom drugom skalom. Jedan od lenjira je bio klizni, te otuda popularno ime *šiber* (od nemačkog *Rechenschieber*). Koristi se jednostavno, pomeranjem klizača i čitanjem vrednosti sa odgovarajuće skale. (Videti zadatke 6.4.1 i 6.4.2.)

Postojale su i kružne varijante, pa i džepne, gde je džepni sat sa logaritmarom i kompasom bio „iPhone“ XIX i prve polovine XX veka.



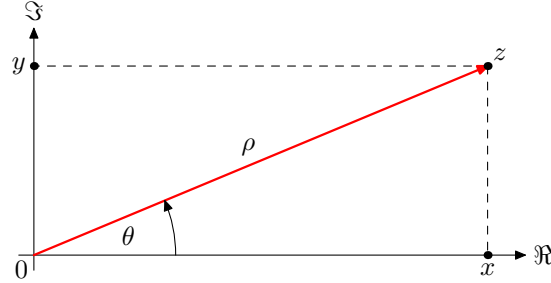
Slika 3: Džepni logaritmar.

Tablice i logaritmari se i danas koriste u vojsci, kao rezerva u slučaju otkazivanja elektronike. Prvi kompjuter ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) je napravljen 1946. godine da bi izračunao tablice za vojsku.

## 5 Razno

### 5.1 Kompleksni logaritam

Ako u kompleksnoj ravni imamo kompleksan broj  $z \in \mathbb{C}$ ,



Slika 4: Broj  $z$  u kompleksnoj ravni.

koji može biti predstavljen kao

$$\begin{aligned} z &= x + iy && \text{pravougle koordinate} \\ &= \rho (\cos \theta + i \sin \theta) && \text{polarne koordinate} \\ &= \rho e^{i\theta} && \text{Ojlerova formula} \end{aligned}$$

onda se, iz Ojlerove formule i jednakosti (7) i (4), dobija

$$\ln z = \ln \rho + i\theta. \quad (27)$$

Pošto je  $\rho = |z| = \sqrt{x^2 + y^2} \geq 0$ , sledi da prirodni logaritam kompleksnog broja  $z$  nije definisan samo za  $z = 0$ , kada je  $\ln z = \infty$ . Kako je  $y/x = \tan \theta$ , prirodni logaritam kompleksnog broja, predstavljenog pravouglim koordinatama, iz formule (27), može se izračunati

$$\ln(x + iy) = \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) + i \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \quad (28)$$

I za kompleksne brojeve važi jednakost promene baze (13), tako da za dva kompleksna broja  $z$  i  $w$ , gde je  $z \neq 0$ ,  $w \neq 0$  i  $w \neq 1$ , sledi

$$\log_w z = \frac{\ln z}{\ln w},$$

gde se  $\ln z$  i  $\ln w$  računaju pomoću formule (27), odnosno, (28). Na primer,

$$\log_{2+i}(3 + 4i) = 2, \quad \log_i e = \frac{2}{i\pi}.$$

Iz Ojlerove formule se može dobiti *najlepša formula u istoriji matematike*, u kojoj je upotrebljeno 5 najvažnijih matematičkih konstanti  $(0, 1, \pi, e, i)$

$$e^{i\pi} + 1 = 0, \quad (29)$$

gde, ako prebacimo 1 na desnu stranu i *logaritmujemo*, dobijamo zanimljivu jednakost

$$\frac{\ln(-1)}{\sqrt{-1}} = \pi.$$

## 5.2 Izvod

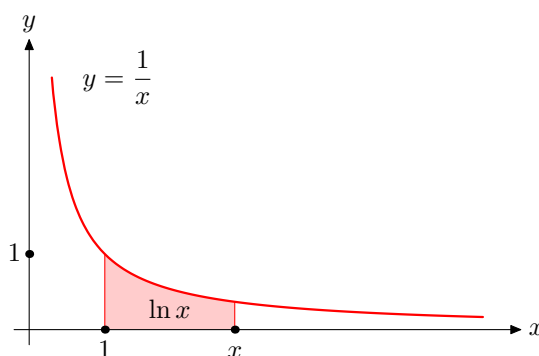
Ako je

$$y = \ln x \Rightarrow y' = \frac{1}{x},$$

odakle se, pomoću jednakosti (13) i jednakosti za izvod složene funkcije, može dobiti

$$y = \log_b(f(x)) \Rightarrow y' = \frac{f'(x)}{f(x) \ln b}. \quad (30)$$

Površina figure ispod funkcije  $y = 1/x$  do  $x$ -ose, u opsegu od 1 do  $x$  iznosi  $\ln x$ . Matematički zapisano:  $\int_1^x dx/x = \ln x$ .



**Slika 5:** Geometrijsko značenje  $\ln x$ .

(Na slici je  $x = e$ , tako da je površina osenčane figure jednaka 1.)

## 5.3 Limes

Ojler je dokazao da je

$$\ln x = \lim_{n \rightarrow \infty} n(\sqrt[n]{x} - 1). \quad (31)$$

## 5.4 Benfordov zakon

Verovatnoća da *početne cifre* neke matematičke ili fizičke konstante (kao i dužine reke, visine planine, broja stanovnika, rastojanja, stanja na računu, ...), budu  $\ell$  za brojnu osnovu  $b$ , prati takozvani *Benfordov zakon* (Frank Benford), i iznosi

$$P(b, \ell) = \log_b \left( 1 + \frac{1}{\ell} \right). \quad (32)$$

## 5.5 Teorema prostih brojeva

Još jedno mesto gde se pojavljuje prirodni logaritam u *teoriji brojeva* je, takozvana, *teorema prostih brojeva* (PNT), kojom se je bavio Gaus kada je imao samo 15–16 godina.

Ako definišemo funkciju  $\pi(n)$  koja ima vrednost *ukupan broj prostih brojeva ne većih od  $n$* , onda važi

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi(n) \ln n}{n} = 1.$$

Posledica ove teoreme je da je  $n$ -ti prost broj  $p_n$ , za veliko  $n$ , otprilike

$$p_n \sim n \ln n.$$

## 5.6 Kvaternioni

Poput skupa kompleksnih brojeva  $\mathbb{C}$ , koji predstavlja objekte u 2D prostoru, skup *kvaterniona*  $\mathbb{H}$ , predstavlja objekte u 3D prostoru. Prvi ih je opisao 1843. godine irski matematičar Hamilton (William Rowan Hamilton), te njemu u čast i oznaka skupa  $\mathbb{H}$ . U informatici su neizbežni deo 3D grafike.

Kvaternion  $q \in \mathbb{H}$  može biti predstavljen kao zbir

$$q = s + v \quad (33)$$

koji se sastoji od skalarnog dela  $s \in \mathbb{R}$  i vektorskog dela  $v \in \mathbb{R}^3$ , gde je

$$v = (x, y, z) = xi + yj + zk \quad (34)$$

3D vektor, a gde su  $i, j$  i  $k$  jedinični vektori po  $x, y$  i  $z$  osi, za koje važi

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1, \quad ij = k, \quad jk = i, \quad ki = j. \quad (35)$$

§ U skupu kvaterniona  $\mathbb{H}$  za operaciju množenja, uopšteno, ne važi *zakon komutacije*:  $ji = -ij = -k$ ,  $kj = -jk = -i$ ,  $ik = -ki = -j$ . Ovo je logično ako se setimo da i kod *Rubikove kocke* najčešće nije svejedno kojim redosledom okrećemo stranice. Važi *asocijativnost*:  $(p \cdot q) \cdot r = p \cdot (q \cdot r)$ .

Da bi  $q = s + v$  bio *pravi* kvaternion, mora biti  $v \neq 0$ , inače je  $q$  običan realan broj, kada se primenjuju operacije i funkcije iz skupa  $\mathbb{R}$ . Ako odredimo apsolutnu vrednost kvaterniona

$$\lambda = |v| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \rho = |q| = \sqrt{s^2 + \lambda^2}$$

koja se zove *norma*, odredimo *jedinični vektor* (*unit*) vektorskog dela kvaterniona

$$u = \frac{v}{\lambda},$$

koji se zove *versor* i gde je po definiciji<sup>1</sup>  $|u| = 1$  i  $u^2 = -1$ , kao i ugao orijentacije

$$\varphi = \arccos\left(\frac{s}{\rho}\right),$$

možemo dobiti polarni zapis kvaterniona

$$q = \rho (\cos \varphi + u \sin \varphi) = \rho e^{u\varphi}. \quad (36)$$

Iz svega ovoga se može dobiti

$$\exp(q) = e^s (\cos \lambda + u \sin \lambda) \quad (37)$$

i

$$\ln(q) = \ln \rho + u\varphi. \quad (38)$$

§ Ostale operacije i funkcije nisu tema ovog rada, ali sabiranje i oduzimanje je uobičajeno, za množenje treba obratiti pažnju na formulu (35) i komutativnost, a recipročna vrednost je  $q^{-1} = \bar{q}/\rho^2$ , gde je  $\bar{q} = s - v$ , *konjugovana* vrednost. Trigonometrijske i hiperbolične funkcije se mogu izraziti pomoću eksponencijalne, a njihove inverzne pomoću logaritamske funkcije.

<sup>1</sup>U skupu  $\mathbb{H}$ ,  $\sqrt{-1}$  ima beskonačno rešenja: svaki kvaternion koji se nalazi na jediničnoj sferi je rešenje ( $s = 0 \wedge x^2 + y^2 + z^2 = 1$ ), odnosno, svaki versor.

## 6 Zadaci i rešenja

### 6.1 Jednačine

#### 6.1.1 FIT

▷ **Zadatak:** Nađi rešenje jednačine

$$\log_2(x-2) + \log_4(x-2) + \log_{16}(x-2) = 7.$$

(Zadatak sa mog prijemnog ispita na FIT „Metropolitan“.)

► **Rešenje:** Vidimo da su osnove logaritama stepeni broja 2, pa iz jednakosti za logaritam stepena osnove (15) sledi

$$\begin{aligned}\log_2(x-2) + \log_{2^2}(x-2) + \log_{2^4}(x-2) &= \\ \log_2(x-2) + \frac{1}{2}\log_2(x-2) + \frac{1}{4}\log_2(x-2) &= \\ \frac{7}{4}\log_2(x-2) &= 7,\end{aligned}$$

odnosno, posle skraćivanja,

$$\log_2(x-2) = 4.$$

Odavde je

$$x-2 = 2^4 = 16 \Rightarrow x = \boxed{18}.$$

#### 6.1.2 Jednačina 2

▷ **Zadatak:** Reši jednačinu

$$2\log(x) - \log(6-x) = 0.$$

► **Rešenje:** Da bi logaritam u jednačini bio definisan mora biti

$$x > 0 \wedge 6-x > 0 \Rightarrow 0 < x < 6.$$

Zbog jednakosti (10) možemo pisati

$$\log(x^2) = \log(6-x)$$

odakle sledi

$$\begin{aligned}x^2 &= 6-x \\ x^2 + x - 6 &= 0.\end{aligned}$$

Rešavanjem kvadratne jednačine

$$\begin{aligned}x_{1,2} &= \frac{-1 \pm \sqrt{1^2 + 4 \cdot 1 \cdot 6}}{2 \cdot 1} \\ &= \frac{-1 \pm \sqrt{25}}{2} \\ &= \frac{-1 \pm 5}{2},\end{aligned}$$

dobijamo rešenja  $x_1 = 2$  i  $x_2 = -3$ , odakle je jedinstveno rešenje

$$x = \boxed{2}.$$

### 6.1.3 Jjjj (yafe)

► **Zadatak:** Reši jednačinu

$$\ln(x) = \ln(15 - x) - \ln(x + 1).$$

► **Rešenje:** Jednačina je definisana za

$$x > 0 \wedge 15 - x > 0 \wedge x + 1 > 0 \Rightarrow 0 < x < 15.$$

Ako zapišemo jednačinu kao

$$\ln(x) + \ln(x + 1) = \ln(15 - x)$$

iz jednakosti za logaritam proizvoda (7), možemo pisati

$$\ln(x(x + 1)) = \ln(15 - x)$$

$$\ln(x^2 + x) = \ln(15 - x)$$

$$x^2 + x = 15 - x$$

$$x^2 + 2x - 15 = 0$$

Rešavanjem kvadratne jednačine dobijamo 2 rešenja,  $x_1 = 3$  i  $x_2 = -5$ , ali zbog uslova, ostaje jedinstveno

$$x = \boxed{3}.$$

### 6.1.4 Četiri četvorke

► **Zadatak:** Dokazati da svaki prirodan broj  $n \in \mathbb{N}$ , može biti predstavljen sa 4 broja 4, pomoću logaritamske funkcije i kvadratnog korena

$$n = \log_{\sqrt{4}/4} \left( \log_4 \underbrace{\sqrt{\sqrt{\dots \sqrt{4}}}}_{n \text{ korena}} \right).$$

► **Rešenje:** Kako je

$$\frac{\sqrt{4}}{4} = \frac{1}{2} \quad \text{i} \quad \underbrace{\sqrt{\sqrt{\dots \sqrt{4}}}}_{n \text{ korena}} = 4^{(1/2)^n},$$

izraz može biti uprošćen

$$\log_{\sqrt{4}/4} \left( \log_4 \underbrace{\sqrt{\sqrt{\dots \sqrt{4}}}}_{n \text{ korena}} \right) = \log_{1/2} (\log_4 4^{(1/2)^n}),$$

gde iz jednakosti za logaritam stepena osnove (4), sledi

$$= \log_{1/2} (1/2)^n$$

$$= \boxed{n}.$$

★ **Dodatak:** Davno je u jednom časopisu postavljen sličan zadatak: da se sa što manje istih brojeva, koristeći bilo koju matematičku funkciju, predstavi svaki prirodan broj  $n$ . Rešio ga je nobelovac Pol Dirak (Paul Dirac) sa 3 broja 2, čije originalno rešenje izgleda

$$-\log_2 \log_2 \sqrt{\dots n \dots \sqrt{2}} = -\log_2 \log_2 2^{2^{-n}} = -\log_2 2^{-n} = n. \quad \square$$

### 6.1.5 Sveska 7

▷ **Zadatak:** Nađi  $x$  ako je

$$x^{\log x} = 1000x^2.$$

► **Rešenje:** Ako logaritmujeemo obe strane dobijamo

$$\begin{aligned}\log x^{\log x} &= \log(1000x^2) \\ \log x \log x &= \log 1000 + \log x^2 \\ \log^2 x &= 3 + 2 \log x,\end{aligned}$$

gde, posle smene  $t = \log x$ , dobijamo kvadratnu jednačinu

$$t^2 - 2t - 3 = 0$$

čija su rešenja  $t_1 = 3$  i  $t_2 = -1$ , odakle su

$$x_1 = 10^3 = \boxed{1000} \quad \text{i} \quad x_2 = 10^{-1} = \boxed{\frac{1}{10}}.$$

### 6.1.6 Beskonačni koren

▷ **Zadatak:** Odredi vrednost

$$x = e^{\sqrt[2]{e^{\sqrt[3]{e^{\sqrt[4]{e^{\sqrt[5]{\dots}}}}}}}}.$$

► **Rešenje:** Izvršimo smenu  $t = \ln x$ . Kako je  $\ln e = 1$  i koristeći jednakost za logaritam proizvoda (7) i jednakost za logaritam korena (11), možemo pisati

$$\begin{aligned}t &= \ln \left( e^{\sqrt[2]{e^{\sqrt[3]{e^{\sqrt[4]{e^{\sqrt[5]{\dots}}}}}}}} \right) \\ &= 1 + \frac{1}{2} \ln \left( e^{\sqrt[3]{e^{\sqrt[4]{e^{\sqrt[5]{\dots}}}}}} \right) \\ &= 1 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \ln \left( e^{\sqrt[4]{e^{\sqrt[5]{\dots}}}} \right) \right) \\ &= 1 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{1}{4} \ln \left( e^{\sqrt[5]{\dots}} \right) \right) \right) \\ &= 1 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{1}{5} \ln(\dots) \right) \right) \right) \\ &= 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} + \dots \\ &= \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} + \dots\end{aligned}$$

Ako pogledamo formulu (21) na strani 7, možemo videti da je ovaj zbir jednak

$$t = e - 1,$$

jer iz sume za izračunavanje  $e$  nedostaje *nulti* član  $1/0! = 1$ . Odavde je

$$x = e^t = \boxed{e^{e-1}} \approx 5,575.$$



### 6.1.7 Net 3

▷ **Zadatak:** Odredi  $n^3$  ako je

7

$$\log_{5n} 30\sqrt{5} = \log_{4n} 48.$$

► **Rešenje:** Prebacimo logaritme u osnovu 6, jer je 6 *nzd* za 30 i 48 iz izraza

$$\begin{aligned} \frac{\log_6 30\sqrt{5}}{\log_6 5n} &= \frac{\log_6 48}{\log_6 4n} \\ \frac{\log_6 6 + \log_6 5 + \frac{1}{2} \log_6 5}{\log_6 5 + \log_6 n} &= \frac{\log_6 6 + \log_6 8}{\log_6 4 + \log_6 n} \\ \frac{1 + \frac{3}{2} \log_6 5}{\log_6 5 + \log_6 n} &= \frac{1 + 3 \log_6 2}{2 \log_6 2 + \log_6 n}. \end{aligned}$$

Kada izvršimo smenu  $n = 6^t$ , odnosno,  $t = \log_6 n$  i  $u = \log_6 2$  i  $v = \log_6 5$ , dobijamo

$$\begin{aligned} \frac{1 + \frac{3}{2}v}{v + t} &= \frac{1 + 3u}{2u + t} \\ (1 + \frac{3}{2}v)(2u + t) &= (1 + 3u)(v + t) \\ 2u + 3uv + t + \frac{3}{2}vt &= v + 3uv + t + 3ut \quad / -3uv; -t; \times 2; \\ 4u + 3vt &= 2v + 6ut \\ 6ut - 3vt &= 4u - 2v \\ t(6u - 3v) &= 4u - 2v \\ t &= \frac{4u - 2v}{6u - 3v} \\ t &= \frac{2}{3} \cdot \frac{2u - v}{2u - v} \\ t &= \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

Oдавде je

$$n^3 = 6^{3t} = \boxed{36}.$$

### 6.1.8 Izumiranje

▷ **Zadatak:** Nađi  $n$  ako je

8

$$\log_2 3 \cdot \log_3 4 \cdot \log_4 5 \cdot \log_5 6 \cdots \log_n (n+1) = 10.$$

► **Rešenje:** Ako prebacimo sve logaritme u osnovu 2, dobijamo

$$\log_2 3 \cdot \frac{\log_2 4}{\log_2 3} \cdot \frac{\log_2 5}{\log_2 4} \cdot \frac{\log_2 6}{\log_2 5} \cdots \frac{\log_2 (n+1)}{\log_2 n} = 10.$$

Vidimo da će, nakon *masovnog* skraćivanja, *izumreti* svi izrazi osim

$$\log_2 (n+1) = 10,$$

odakle je,

$$n+1 = 2^{10} = 1024 \Rightarrow n = \boxed{1023}.$$

## 6.2 Nejednačine

### 6.2.1 Sveska 11

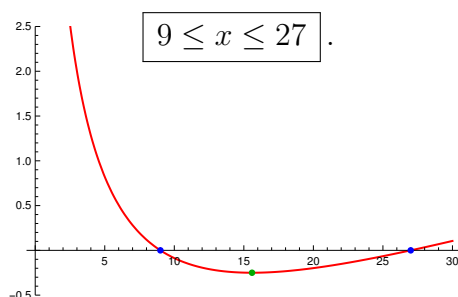
▷ **Zadatak:** Reši nejednačinu

$$\log_3^2 x - 5 \log_3 x + 6 \leq 0.$$

► **Rešenje:** Kada izvršimo zamenu  $t = \log_3 x$ , možemo pisati da je

$$t^2 - 5t + 6 \leq 0$$

Kako su rešenja kvadratne jednačine  $t_1 = 2$  i  $t_2 = 3$ , nejednačina je zadovoljena kada je  $t \in [2, 3]$ . Pošto je  $x = 3^t$ , sledi da je nejednačina zadovoljena za  $x \in [3^2, 3^3]$ , odnosno,



**Slika 6:**  $y = \log_3^2 x - 5 \log_3 x + 6$ .

★ **Dodatak:** Funkcija ima minimum za  $t = 5/2$ , odnosno, u tački  $(9\sqrt{3}, -1/4)$ .

### 6.2.2 Sveska 9

▷ **Zadatak:** Odredi u kojim granicama je zadovoljen uslov

$$\log_3(x^2 - 4) < \log_3 5.$$

► **Rešenje:** Ako se oslobodimo logaritma

$$\begin{aligned} x^2 - 4 &< 5 \\ x^2 &< 9, \end{aligned}$$

dobićemo da je  $-3 < x < 3$ . Međutim, da bi logaritam bio definisan mora biti

$$\begin{aligned} x^2 - 4 &> 0 \\ x^2 &> 4, \end{aligned}$$

odnosno,  $x < -2$  ili  $x > 2$ . Odavde je

$$x \in (-3, -2) \cup (2, 3).$$



**Slika 7:**  $y = \log_3(x^2 - 4)$ ;  $\log_3 5$ .

### 6.2.3 Sveska 10

▷ **Zadatak:** Reši nejednačinu

11

$$\log_5 x \geq \frac{1}{2} \log_5 (3x - 2).$$

► **Rešenje:** Da bi logaritam bio definisan, vidimo da mora biti

$$3x - 2 > 0 \Rightarrow x > \frac{2}{3}.$$

Ako nejednačinu pomnožimo sa 2, dobijamo

$$\begin{aligned} 2 \log_5 x &\geq \log_5 (3x - 2) \\ \log_5 x^2 &\geq \log_5 (3x - 2) \\ x^2 &\geq 3x - 2 \\ x^2 - 3x + 2 &\geq 0. \end{aligned}$$

Kvadratna jednačina ima rešenja  $x_1 = 1$  i  $x_2 = 2$ , pa je rešenje nejednačine

$$x \in \left( \frac{2}{3}, 1 \right] \cup [2, \infty).$$



Slika 8:  $y = \log_5 x$ ;  $\frac{1}{2} \log_5 (3x - 2)$ .

### 6.2.4 Net 1

▷ **Zadatak:** Reši

12

$$\log_{3x+5} (9x^2 + 8x + 8) > 2.$$

► **Rešenje:** Ako antilogaritmujemo obe strane dobijamo

$$\begin{aligned} 9x^2 + 8x + 8 &> (3x + 5)^2 \\ 9x^2 + 8x + 8 &> 9x^2 + 30x + 25 \\ 8x + 8 &> 30x + 25, \end{aligned}$$

gde je nakon sređivanja

$$x < -\frac{17}{22}$$

Sledeći uslov je da osnova bude veća od 1, to jest

$$\begin{aligned} 3x + 5 &> 1 \\ x &> -\frac{4}{3}, \end{aligned}$$

odakle sledi rešenje

$$x \in \left( -\frac{4}{3}, -\frac{17}{22} \right).$$



**Slika 9:**  $y = \log_{3x+5}(9x^2 + 8x + 8)$ ; 2.

### 6.2.5 Net 2

▷ **Zadatak:** Nađi vrednosti koje zadovoljavaju nejednačinu

13

$$\log_7(x + 5) > \log_5(x + 5).$$

► **Rešenje:** Prebacimo izraz u zajednički logaritam

$$\begin{aligned} \frac{\log(x + 5)}{\log 7} &> \frac{\log(x + 5)}{\log 5} \\ \log 5 \log(x + 5) &> \log 7 \log(x + 5). \end{aligned}$$

Kako je  $\log 5 < \log 7$  i pozitivni su, da bi uslov važio, mora biti

$$\log(x + 5) < 0,$$

odakle je

$$\begin{aligned} x + 5 &< 1 \\ x &< -4, \end{aligned}$$

a da bi logaritam bio definisan mora da važi i

$$\begin{aligned} x + 5 &> 0 \\ x &> -5, \end{aligned}$$

odakle je rešenje

$$x \in (-5, -4).$$



Slika 10:  $y = \log_7(x+5)$ ;  $\log_5(x+5)$ .

### 6.2.6 Net 6

▷ **Zadatak:** Koje vrednosti zadovoljavaju uslov

14

$$\log_2(x+1) > \log_4 x^2?$$

► **Rešenje:** Ako levu stranu zapišemo kao

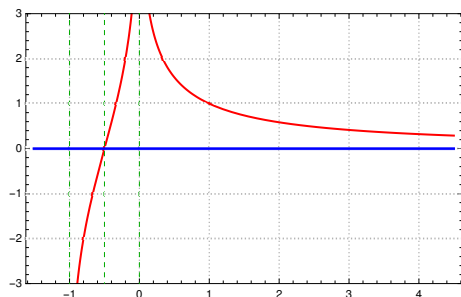
$$2 \cdot \frac{1}{2} \log_2(x+1) = \log_{2^2}(x+1)^2$$

što sledi iz jednakosti (15) i (10), dobićemo

$$\begin{aligned} \log_4(x+1)^2 &> \log_4 x^2 \\ (x+1)^2 &> x^2 \\ x^2 + 2x + 1 &> x^2 \\ 2x + 1 &> 0 \\ x &> -\frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Kako mora da važi  $x > -1$  i  $x \neq 0$ , dobijamo konačno rešenje

$$x \in \left( -\frac{1}{2}, 0 \right) \cup (0, \infty).$$



Slika 11:  $y = \log_2(x+1) - \log_4 x^2$ .

★ **Dodatak:** Kao što je na strani 5 napomenuto, da smo  $\log_4 x^2$  jednostavno predstavili kao  $\log_{2^2} x^2 = \log_2 x$ , dobili bismo netačno rešenje. Ispravno bi bilo  $\log_4 x^2 = \log_2 |x|$ , kada bismo posebno gledali 2 slučaja: za  $x > 0$  i za  $x < 0$ .

### 6.2.7 Granice

► **Zadatak:** Dokaži da važi nejednakost

15

$$1 - \frac{1}{x} \leq \ln x \leq x - 1, \quad (39)$$

kojom se definišu *donja* i *gornja* granica prirodnog logaritma.

► **Rešenje:** Pogledajmo prvo desni deo nejednakosti. Ako definišemo funkciju

$$y = \ln x - (x - 1),$$

potrebno je da dokažemo da je  $y \leq 0$  za svako  $x > 0$ . Intuitivno je jasno da tvđenje važi, jer  $\ln x$  mnogo sporije raste od  $x - 1$ , i formalni dokaz ćemo bazirati na tome. Prvi izvod funkcije je

$$y' = \frac{1}{x} - 1,$$

koji ima jedinstvenu nulu  $y' = 0$  za  $x = 1$ , gde je i  $y = 0$ . Kako je drugi izvod

$$y'' = -\frac{1}{x^2} < 0,$$

uvek negativan, to znači da funkcija  $y$  nema *prevojnih tačaka* i da tačka  $(1, 0)$  predstavlja *maksimum* funkcije  $y$ , odakle je  $y \leq 0$ , odnosno,

$$\ln x \leq x - 1.$$

Ako u ovu nejednakost umesto  $x$  stavimo  $1/x$ , možemo pisati

$$\begin{aligned} \ln(1/x) &\leq \frac{1}{x} - 1 \\ -\ln x &\leq \frac{1}{x} - 1, \end{aligned}$$

gde, kada izrazi zamene strane, dobijamo

$$1 - \frac{1}{x} \leq \ln x,$$

što predstavlja levi deo nejednakosti iz zadatka. □



Slika 12:  $y = 1 - 1/x$ ;  $\ln x$ ;  $x - 1$ .

★ **Dodatak:** Sve tri funkcije se *dodiruju* u tački  $(1, 0)$ , što znači da u toj tački sve tri imaju istu *tangentu*, odnosno, isti prvi izvod  $y'(1) = 1$ ; inače bi se sekle i nejednakost ne bi važila.

## 6.3 Kratki primeri

### 6.3.1 Zemljotres

- ▷ **Zadatak:** Magnituda zemljotresa  $M$  po *Rihterovoj skali* zavisi logaritamski od intenziteta zemljotresa  $I$

16

$$M = \log_{10} I.$$

U avgustu 2009, japansko ostrvo Honšu je pogodio zemljotres magnitude  $M_1 = 6,1$  po Rihteru, a u martu 2011, razarajući zemljotres koji je bio oko 800 puta jači od prvog. Koliko stepeni po Rihteru je imao drugi? (Koristi logaritamske tablice ili logaritmar.)

- **Rešenje:**  $M_2 = M_1 + \log_{10} 800 \approx 6,1 + 2,9 = \boxed{9,0}$  stepeni Rihtera.

### 6.3.2 Decimalne cifre

- ▷ **Zadatak:** Koliko decimalnih cifara  $d$  ima 128-bitna promenljiva? ( $\log_{10} 2 \approx 0,30103$ )

17

- **Rešenje:**  $d = \lfloor \log_{10} 2^{128} \rfloor + 1 = \lfloor 128 \log_{10} 2 \rfloor + 1 = \lfloor 38,53184 \rfloor + 1 = 38 + 1 = \boxed{39}$ .

### 6.3.3 Poluraspad joda

- ▷ **Zadatak:** Ako imamo 63 g izotopa joda  $^{131}\text{I}$ , a znamo da smo pre 11 dana imali 163 g, koje je vreme poluraspada ovog izotopa? (Koristi prirodni logaritam.)

18

- **Rešenje:** Iz formule (19) na strani 7, sledi da se vreme poluraspada može izračunati

$$t_{1/2} = \frac{t}{\log_2(m_0/m_t)} = \frac{t \ln 2}{\ln(m_0/m_t)} = \frac{11 \ln 2}{\ln(163/63)} \approx \boxed{8,02 \text{ dana}}.$$

### 6.3.4 Geometrijski niz

- ▷ **Zadatak:** Za  $0 \leq x < 1$ , uprostiti izraz

19

$$y = \log(1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots).$$

- **Rešenje:** Kako je zbir<sup>2</sup> beskonačnog geometrijskog niza

$$1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots = \frac{1}{1-x},$$

može se pisati

$$y = \log\left(\frac{1}{1-x}\right),$$

gde iz jednakosti za recipročnu vrednost (9), sledi

$$= \boxed{-\log(1-x)}.$$

---

<sup>2</sup>**Dokaz:** Ako je  $s = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots = 1 + x \cdot (1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots) = 1 + x \cdot s$ , odakle je  $s - x \cdot s = 1$ , sledi da je  $s = 1/(1-x)$ .  $\square$

### 6.3.5 Izvod

▷ **Zadatak:** Odredi izvod funkcije  $f(\alpha) = \ln \operatorname{sinc} \alpha$ , gde je  $\operatorname{sinc} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\alpha}$ . 20

► **Rešenje:** Pomoću jednakosti (8) razložimo funkciju na

$$f(\alpha) = \ln \sin \alpha - \ln \alpha,$$

a kako je izvod  $\sin \alpha$  jednak  $\cos \alpha$  i iz jednakosti (30) za izvod logaritma funkcije, sledi da je

$$f'(\alpha) = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{1}{\alpha} = \boxed{\cot \alpha - \frac{1}{\alpha}}.$$

### 6.3.6 $i$ na $i$

▷ **Zadatak:** Odredi vrednost  $i^i$  gde je  $i = \sqrt{-1}$ , imaginarna jedinica. 21

► **Rešenje:** Kako u kompleksnoj ravni  $i$  ima polarne koordinate  $\rho = 1$  i  $\theta = \pi/2$ , ako ga predstavimo Ojlerovom formulom kao  $i = e^{i\pi/2}$  i iz jednakosti (12) i (4), sledi da je

$$i^i = e^{i \ln i} = e^{i \ln e^{i\pi/2}} = e^{i^2 \pi/2} = \boxed{e^{-\pi/2}} \approx 0,20788$$

realan broj.

### 6.3.7 $\ln(-z)$

▷ **Zadatak:** U skupu kompleksnih brojeva  $\mathbb{C}$ , ako znamo vrednost  $\ln z$ , koliko je  $\ln(-z)$ ? 22

► **Rešenje:** Kako je u kompleksnoj ravni  $-z$  jednako  $z$  zarotirano oko koordinatnog početka za ugao od  $180^\circ = \pi$ , dobijamo

$$\ln(-z) = \boxed{\ln z + i\pi}.$$

Ako proverimo pomoću Ojlerove jednačine (29), dobijamo

$$e^{\ln(-z)} = e^{\ln z + i\pi} = e^{\ln z} \cdot e^{i\pi} = z \cdot (-1) = -z.$$

★ **Dodatak:** Hmm... trik sa rotacijom nije baš potpuno tačan: dobili bismo  $-z$  i za ugao  $-\pi$ , pa bi bilo  $\ln(-z) = \ln z - i\pi$ , što je takođe tačno; u stvari, tačno je za bilo koji ugao  $\pi + 2k\pi$  gde je  $k \in \mathbb{Z}$  ceo broj. Odavde bi sledilo da je

$$\ln(-z) = \ln z + i(\pi + 2k\pi), \quad k \in \mathbb{Z}.$$


I sama formula (27),  $\ln z = \ln \rho + i\theta$ , predstavlja samo glavnu granu kompleksnog logaritma, koji je nekakva vrsta 4D spirale. Potpuna formula bi bila

$$\ln z = \ln \rho + i(\theta + 2k\pi), \quad k \in \mathbb{Z}. \quad (40)$$

### 6.3.8 Prvo, pa 1

▷ **Zadatak:** Koliki procenat cena od igle do lokomotive počinje cifrom 1? 23

► **Rešenje:** Iz formule (32) sa strane 11 sledi da je  $P(10, 1) = \log_{10} 2 \approx \boxed{30\%}$ .

★ **Dodatak:** Ovu zakonitost je prvi otkrio 1881. astronom Njucom (Simon Newcomb), kada je primetio da su listovi logaritamskih tablica koje je dugo koristio najprljaviji na početku: . U filmu *Računovođa* (*The Accountant*), glavni lik (Ben Afflec) otkriva da su finansijski izveštaji prepravljani, jer uviđa da iznosi ne prate ovo pravilo.



## 6.4 Ručni rad

### 6.4.1 Analogni stepen

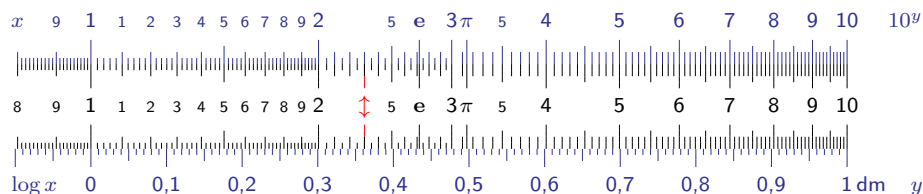
▷ **Zadatak:** Odredi logaritmarom približnu vrednost  $z = 2,3^{1,7}$ .

24

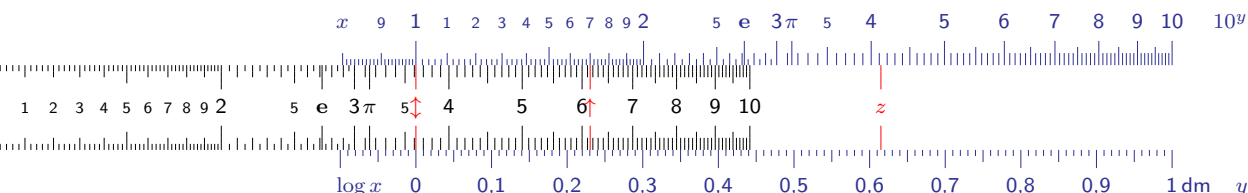
► **Rešenje:** Pomoću jednakosti (12) predstavimo

$$z = 2,3^{1,7} = 10^{1,7 \cdot \log(2,3)}.$$

Prvo određujemo vrednost  $\log(2,3)$  tako što za  $x = 2,3$  čitamo ispod vrednost  $\log x$ . Nalazimo da je  $\log(2,3) \approx 0,362$  (vidi nit obeleženu sa  $\uparrow$ ).



Nakon toga, tu vrednost na klizaču poravnavamo sa  $x = 1$ . Kako na klizaču ne postoji 0,362, postavimo na 3,62, s tim što ćemo rezultat podeliti sa 10. Sada, za  $x = 1,7$  čitamo vrednost na klizaču ispod ( $\uparrow$ )



i nalazimo da je oko 6,15, što znači da je  $1,7 \cdot \log(2,3) \approx 0,615$ . Potom, za  $y = 0,615$  čitamo vrednost  $10^y$  i nalazimo da je oko 4,12 što je i rešenje

$$z = 2,3^{1,7} \approx \boxed{4,12},$$

a tačna vrednost je  $z = 4,120380 \dots$

### 6.4.2 Analogni kvadratni koren

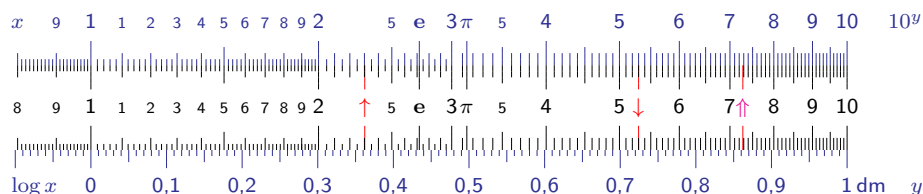
▷ **Zadatak:** Objasni način za određivanje vrednosti  $\sqrt{x}$  logaritmarom.

25

► **Rešenje:** Uz malo vežbe, kvadratni koren možemo direktno čitati sa logaritmara ako u glavi izvršimo deljenje sa 2 i, po potrebi, sabiranje sa 0,5, što je vrlo jednostavno, jer se radi o brojevima između 0 i 1 sa najviše 3 decimale. Kako je

$$\sqrt{x} = 10^{\frac{1}{2} \log x},$$

potrebno je pročitati vrednost  $\log x$ , a onda za dvostruko manju vrednost od nje, pročitati vrednost  $10^y$ . Na primer, za izračunavanje  $\sqrt{5,3}$ , čitamo da je  $\log 5,3 \approx 0,724$  ( $\downarrow$ ), a onda, za  $y = 0,724/2 = 0,362$  ( $\uparrow$ ), čitamo vrednost  $10^y$  i dobijamo  $\sqrt{5,3} \approx 2,3$  ( $2,3^2 = 5,29$ ).



Za  $\sqrt{53}$  treba u  $y$  dodati još 0,5 tako da je  $y = 0,362 + 0,5 = 0,862$  ( $\uparrow$ ), odakle je  $\sqrt{53} \approx 7,28$  ( $7,28^2 = 52,9984$ ). Naravno,  $\sqrt{530}$  se računa kao  $10\sqrt{5,3}$ , ili  $\sqrt{0,53} = \frac{1}{10}\sqrt{53}$ .

### 6.4.3 $\ln 3$

► **Zadatak:** U čast Nepera i Briggsa, pomoću postupka (23) sa strane 8, izračunaj *peške* približnu vrednost  $\ln 3$  u 5 koraka. Za upoređivanje, tačna vrednost je

$$\ln 3 = 1,0986122886\ 6810969139\ 5245236922\ 5257046475 \dots$$

► **Rešenje:** Za  $x = 3$ , izraz  $r = (x - 1)/(x + 1) = 1/2$ . U nultom koraku postavljamo početne vrednosti:

$$\text{Korak } 0. \quad k = 1, \quad p = 2r = 1, \quad q = r^2 = 1/4, \quad a = p = 1, \quad y = a = 1.$$

Slede koraci iteracije — povećamo  $k$  za 2, pomnožimo  $p$  sa  $q$ , član sume  $a$  postaje  $p/k$ , koga dodajemo u rezultat  $y$ :

$$\text{Korak } 1. \quad k = 3, \quad p = 1/4, \quad a = 1/12, \quad y = 13/12;$$

$$\text{Korak } 2. \quad k = 5, \quad p = 1/16, \quad a = 1/80, \quad y = 263/240;$$

$$\text{Korak } 3. \quad k = 7, \quad p = 1/64, \quad a = 1/448, \quad y = 7379/6720;$$

$$\text{Korak } 4. \quad k = 9, \quad p = 1/256, \quad a = 1/2304, \quad y = 88583/80640;$$

$$\text{Korak } 5. \quad k = 11, \quad p = 1/1024, \quad a = 1/11264, \quad y = 3897967/3548160.$$

Rezultat je

$$\ln 3 \approx \frac{3897967}{3548160} \approx \boxed{1,0986},$$

što nije loše za samo 5 koraka, jer je apsolutna greška oko  $2,4 \times 10^{-5}$ . Ali, može bolje...

★ **Dodatak:** Ako već imamo precizno izračunatu vrednost  $\ln 2$ , onda je bolje računati  $\ln 3$  kao  $\ln(3/4) + 2 \ln 2$ , jer će u postupku, umesto  $r = 1/2$ , biti  $r = (3/4 - 1)/(3/4 + 1) = -1/7$ , odnosno, umesto  $q = 1/4$ , biće  $q = 1/49$ , što dovodi do mnogo bržeg izračunavanja. U istom broju koraka bismo dobili

$$\ln \frac{3}{4} \approx -\frac{2}{7} - \frac{296}{1029} - \frac{72526}{252105} - \frac{24876448}{86472015} - \frac{522405418}{1815912315} - \frac{281576520392}{978776737785},$$

gde poslednji razlomak ima grešku od oko  $1,6 \times 10^{-12}$ , što je više od dvostruko tačnih cifara. Kada mu (sa strane 8) dodamo  $2 \ln 2$ , dobićemo

$$\ln 3 \approx 2 \ln 2 - \frac{281576520392}{978776737785} = \underbrace{1,0986122886\ 6972615081 \dots}_{12 \text{ tačnih cifara}}$$

Upošteno, ovakav način je najbrži ako računamo  $\ln x = \ln(x/2^n) + n \ln 2$ , gde biramo  $n$  takvo da  $x/2^n$  bude što bliže 1, odnosno, da  $q$  bude najmanje moguće (vidi program).

```

10 REM ln(x) algorithm test
20 LET eps=0: LET hi=500: LET lo=hi/2: LET n=0: LET r=2: GO
T lo=hi/2: LET n=n+1: LET r=r/2: GO
SUB 140: LET ln2=y
30 FOR x=1 TO 20: GO SUB 100:
PRINT "ln("x");":TAB 6;"="y;
TAB 22;"n="n;:NEXT x
99 STOP
100 REM logarithmus naturalis
110 LET r=x: LET n=0
120 IF r>hi THEN LET r=r/2: LET
n=n+1: GO TO 120
130 IF r<lo THEN LET r=r*2: LET
n=n-1: GO TO 130
140 LET r=(r-1)/(r+1): LET k=1:
LET p=2*r: LET q=r*r: LET a=p:
LET y=a: LET z=0
150 IF ABS(y-z)>eps THEN LET k
=k+2: LET p=p*q: LET a=p/k: LET
z=y: LET y=y+a: GO TO 150
160 IF n>0 THEN LET y=y+n*ln2
170 RETURN
RUN

```

ln(1)	=	0	n	=	0
ln(2)	=	0.69314718	n	=	1
ln(3)	=	1.0986123	n	=	1
ln(4)	=	1.3862944	n	=	2
ln(5)	=	1.6094379	n	=	2
ln(6)	=	1.7917595	n	=	3
ln(7)	=	1.9459101	n	=	3
ln(8)	=	2.0794415	n	=	3
ln(9)	=	2.1972246	n	=	3
ln(10)	=	2.3025851	n	=	3
ln(11)	=	2.3978953	n	=	3
ln(12)	=	2.4849066	n	=	4
ln(13)	=	2.5649494	n	=	4
ln(14)	=	2.6390573	n	=	4
ln(15)	=	2.7080502	n	=	4
ln(16)	=	2.7725887	n	=	4
ln(17)	=	2.8332133	n	=	4
ln(18)	=	2.8903718	n	=	4
ln(19)	=	2.944439	n	=	4
ln(20)	=	2.9957323	n	=	4

9 STOP statement, 99:1


Slika 13: ZX Spectrum BASIC program.

## A Reference

### A.1 Literatura

- [1] Larousse: „Matematika“, *Opšta enciklopedija* (1967)
- [2] Nebojša Ikodinović, Slađana Dimitrijević, Suzana Aleksić: „Udžbenik sa zbirkom zadataka za 2. razred gimnazije“, *Matematika 2* (2019)
- [3] Vene Bogoslavov: „Zbirka rešenih zadataka iz matematike 2“, (2008–2011)
- [4] Marjan M. Matejić, Lidiya V. Stefanović, Branislav M. Ranđelović, Igor Ž. Milovanović: „Kompleti zadataka za prijemni ispit“, *Matematika* (2011)
- [5] Rade Nikolić: „Zadaci za prijemni ispit iz matematike na Fakultet informacionih tehnologija“, (2020)
- [6] Milton Abramowitz, Irene Stegun: „Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables“, *Applied Mathematics* (1964)
- [7] Gradimir V. Milovanović, Đorđe R. Đorđević: „Programiranje numeričkih metoda“, (1981)
- [8] Donald E. Knuth: „Seminumerical Algorithms“, *The Art of Computer Programming* (1968–)
- [9] Dragoljub Vasić, Vene Bogoslavov, Gliša Nešković: „Logaritamske tablice“, (2008)
- [10] Henry Briggs: „Arithmetica logarithmica“, (1624)
- [11] Donald E. Knuth: „The  $\text{\TeX}$ book“, *Computers and Typesetting* (1996)
- [12] John D. Hobby: „User’s manual“, *METAPOST* (2024)

### A.2 Software

- [1] Mathematica — Wolfram Research
- [2] Visual Studio Code (Integrated Development Environment) — Microsoft
- [3] **ZX BASIC** (programming language) — Sinclair Research Ltd.
- [4] **Pascal** (programming language) — Niklaus Wirth
- [5]  (programming language) — Google
- [6] **Python** (programming language) — Python Software Foundation
- [7] METAPOST (PostScript programming language)— John D. Hobby
- [8]  $\text{\TeX}$  (typesetting system) — Donald E. Knuth
- [9]  $\text{\LaTeX}$  ( $\text{\TeX}$  macros) — Leslie Lamport
- [10]  $\mathcal{A}\mathcal{M}\mathcal{S}\text{\TeX}$  ( $\text{\TeX}$  macros) — American Mathematical Society

## A.3 Linkovi

- [1] **GitHub** — Luka S. Nešić — Maturski rad — Logaritam  
<https://github.com/Nasumica/LukaMaturski/raw/refs/heads/main/log.pdf>
- [2] **WIKIPEDIA** — Logarithm  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Logarithm>
- [3] **Wolfram MathWorld** — Logarithm  
<https://mathworld.wolfram.com/Logarithm.html>
- [4] **Wolfram MathWorld** — Antiogarithm  
<https://mathworld.wolfram.com/Antilogarithm.html>
- [5] **Wolfram Language & System Documentation Center** — Logarithm  
<https://reference.wolfram.com/language/ref/Log.html>
- [6] **WolframAlpha** — Computational Intelligence  
<https://www.wolframalpha.com/>
- [7] A reconstruction of the tables of Briggs' *Arithmetica logarithmica* (1624)  
<https://inria.hal.science/inria-00543939/PDF/briggs1624doc.pdf>
- [8] **WIKIPEDIA** — Benford's law  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Benford's\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Benford's_law)
- [9] **IMDb** — The Accountant (2016)  
<https://www.imdb.com/title/tt2140479/>
- [10] Newman's Short Proof of the Prime Number Theorem  
<https://people.mpim-bonn.mpg.de/zagier/files/doi/10.2307/2975232/fulltext.pdf>
- [11] **WIKIPEDIA** — Quaternion  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternion>
- [12] **Wolfram Language & System Documentation Center** — Quaternions Package  
<https://reference.wolfram.com/language/Quaternions/tutorial/Quaternions.html>
- [13] **YouTube** — Log Tables — Numberphile  
<https://www.youtube.com/watch?v=VRzH4xB0GdM>
- [14] **YouTube** — The iPhone of Slide Rules — Numberphile  
<https://www.youtube.com/watch?v=xRpR1rmPbJE>
- [15] **YouTube** — The Four 4s — Numberphile  
<https://www.youtube.com/watch?v=Noo4lN-vSvw>
- [16] **YouTube** — Fantastic Quaternions — Numberphile  
<https://www.youtube.com/watch?v=3BR8tK-LuB0>
- [17] **GitHub** — Srbslav D. Nešić — Numerical recipes in Pascal  
<https://github.com/Nasumica/Wirth>

