

Numerička matematika

5. predavanje

Saša Singer

`singer@math.hr`

`web.math.pmf.unizg.hr/~singer`

PMF – Matematički odsjek, Zagreb

Sadržaj predavanja

- Interpolacija polinomima:
 - Newtonova baza i podijeljene razlike.
 - Računanje Newtonovog oblika IP.
 - Newton za ekvidistantne čvorove, konačne razlike.
 - Koliko je dobar interpolacijski polinom?
 - Primjer Runge.
 - Optimalni izbor čvorova i Čebiševljeva mreža.
 - Hermiteova interpolacija i ocjena greške.
 - Newtonov oblik Hermiteovog IP.
- Interpolacija splajnovima:
 - Uvod u polinomnu spline interpolaciju.
 - Linearni spline i ocjena greške.

Informacije

Konzultacije (službeno):

- 🕒 samo za NM: utorak u 13 sati (iza predavanja),
- 🕒 petak, 12–14 sati, ili — po dogovoru.

Ne zaboravite, “žive” su i **domaće zadaće** na adresi

<http://web.math.hr/nastava/unm/zadace.php>

ili, izravno

<http://degiorgi.math.hr/nm/>

Dodatni bodovi “čekaju na vas”.

Informacije

Moja web stranica za **Numeričku matematiku** je

http://web.math.hr/~singer/num_mat/

Tamo su kompletna **predavanja** iz prošlih godina, a stizat će i **nova** (kako nastaju).

Skraćena verzija skripte — 1. dio (prvih 7 tjedana):

http://web.math.hr/~singer/num_mat/num_mat1.pdf

Skraćena verzija skripte — 2. dio (drugih 6 tjedana):

http://web.math.hr/~singer/num_mat/num_mat2.pdf

Informacije — demonstratori

Kolegij “Numerička matematika” ima **dvije demonstratorice**:

● **Angela Bašić–Šiško**

● termin: **ponedjeljak, 12–14.**

● e-mail: **abasic@student.math.hr**

● **Mia Jukić**

● termin: **srijeda, 14–16.**

● e-mail: **mia.jukic2@gmail.com**

Demosice lijepo **mole** da im se **najavite** mailom bar **dan ranije!**

● Sastanak za demonstrature je pred **oglasnom pločom**
(bar zasad).

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Lagrangeov oblik interpolacijskog polinoma

- nije pogodan za dodavanje čvorova, tj. za postupno povećanje stupnja interpolacijskog polinoma.

Postoji i Newtonova forma interpolacijskog polinoma,

- koja se može izvesti tako da se interpolacijskom polinomu dodaju nove točke interpolacije, tj. povećava se stupanj interpolacijskog polinoma.

Početak konstrukcije = interpolacijski polinom stupnja 0:

Krećemo od čvora x_0 i konstante p_0 koja interpolira funkciju f u čvoru x_0

$$p_0(x) = f_0.$$

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Prvi korak = interpolacijski polinom stupnja 1:

• Dodajmo još jedan čvor interpolacije, x_1 .

Polinom p_1 napišimo kao zbroj polinoma p_0 i korekcije r_1 ,

$$p_1(x) = p_0(x) + r_1(x).$$

Prvo uočimo:

• r_1 mora biti stupnja (najviše) 1.

Zatim, iz uvjeta interpolacije u ranijem čvoru x_0 imamo

$$f_0 = p_1(x_0) = p_0(x_0) + r_1(x_0) = f_0 + r_1(x_0),$$

tj. mora biti $r_1(x_0) = 0$. Dakle, r_1 mora imati oblik

$$r_1(x) = a_1(x - x_0).$$

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Na kraju, iz uvjeta interpolacije u **novom** čvoru x_1 imamo

$$f_1 = p_1(x_1) = p_0(x_1) + r_1(x_1) = f_0 + r_1(x_1),$$

tj. mora biti $r_1(x_1) = f_1 - f_0$. Iz $r_1(x_1) = a_1(x_1 - x_0)$ izlazi

$$a_1 = \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0}.$$

Drugi korak = interpolacijski polinom stupnja 2:

• **Dodajmo** još jedan čvor interpolacije, x_2 .

Polinom p_2 napišimo kao zbroj polinoma p_1 i **korekcije** r_2 ,

$$p_2(x) = p_1(x) + r_2(x).$$

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Opet, korekcija r_2 mora biti stupnja (najviše) 2.

Iz uvjeta interpolacije u ranijim čvorovima x_0 i x_1 imamo

$$f_k = p_2(x_k) = p_1(x_k) + r_2(x_k) = f_k + r_2(x_k), \quad k = 0, 1,$$

tj. mora biti $r_2(x_0) = r_2(x_1) = 0$. Dakle, r_2 mora imati oblik

$$r_2(x) = a_2(x - x_0)(x - x_1).$$

Na kraju, koeficijent a_2 računamo iz uvjeta interpolacije u novom čvoru x_2 .

U nastavku konstrukcije, na isti način dobivamo iste zaključke:

- Korekcija mora imati nultočke u svim ranijim čvorovima,
- a koeficijent izlazi iz uvjeta interpolacije u novom čvoru.

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Nastavimo li postupak do čvora x_n , dobit ćemo interpolacijski polinom

$$p_n(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + \cdots + a_n \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_k),$$

zapisan u “donjoj trokutastoj” ili Newtonovoj bazi

$$1, (x - x_0), (x - x_0)(x - x_1), \dots, \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_k)$$

u prostoru polinoma stupnja manjeg ili jednakog n .

Sada samo treba **odrediti** koeficijente a_k . Prethodni postupak odgovara **supstituciji** unaprijed. Međutim, može i elegantnije, što otkriva **dodatna** svojstva koeficijenata a_k !

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Već smo pokazali da je

$$a_0 = f_0, \quad a_1 = \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0}.$$

Budući da **dižemo** stupanj interpolacijskog polinoma, onda a_k **ovisi samo o** funkciji f i “trenutnim” čvorovima x_0, \dots, x_k .

Oznaka i definicija za koeficijente u **Newtonovom** obliku IP:

$$a_k = f[x_0, \dots, x_k], \quad k = 0, \dots, n,$$

a veličinu $f[x_0, \dots, x_k]$ zovemo

• k -ta **podijeljena razlika** funkcije f s čvorovima x_0, \dots, x_k .

Katkad se koristi “**operatorska**” oznaka $[x_0, \dots, x_k]f$.

Podijeljene razlike

Lema. Za međusobno različite čvorove x_0, \dots, x_n , podijeljena razlika $f[x_0, \dots, x_n]$ **ne ovisi** o permutaciji čvorova σ , tj.

$$f[x_0, \dots, x_n] = f[x_{\sigma(0)}, \dots, x_{\sigma(n)}].$$

Dokaz. Označimo koeficijente interpolacijskog polinoma p_n

• s a_k — ako je **poredak čvorova** x_0, \dots, x_n ,

• s b_k — ako je **poredak čvorova** $x_{\sigma(0)}, \dots, x_{\sigma(n)}$.

Dakle,

$$\begin{aligned} p_n(x) &= a_0 + a_1(x - x_0) + \dots + a_n \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_k) \\ &= b_0 + b_1(x - x_{\sigma(0)}) + \dots + b_n \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_{\sigma(k)}). \end{aligned}$$

Podijeljene razlike

Oba zapisa predstavljaju isti polinom p_n , pa

- koeficijenti uz odgovarajuće potencije od x moraju biti jednaki.

Uspoređivanjem koeficijenata uz x^n vidimo da je $a_n = b_n$. ■

Ostaje još samo pitanje kako efikasno računati $f[x_0, \dots, x_n]$.

Lema. Za podijeljene razlike vrijedi sljedeća rekurzija

$$f[x_0, \dots, x_n] = \frac{f[x_1, \dots, x_n] - f[x_0, \dots, x_{n-1}]}{x_n - x_0},$$

s tim da je $f[x_k] = f_k$.

Podijeljene razlike

Dokaz. Označimo koeficijente interpolacijskog polinoma p_n u odgovarajućem **Newtonovom** obliku

• s a_k — ako je **poredak čvorova** x_0, \dots, x_n ,

• s b_k — ako je **poredak čvorova** x_n, \dots, x_0 .

Dakle,

$$\begin{aligned} p_n(x) &= a_0 + a_1(x - x_0) + \dots + a_n \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_k) \\ &= b_0 + b_1(x - x_n) + \dots + b_n \prod_{k=1}^n (x - x_k). \end{aligned}$$

U prethodnoj lemi je dokazano da je $a_n = b_n$. Usporedimo sad koeficijente uz x^{n-1} .

Podijeljene razlike

Koeficijent uz x^{n-1} dobivamo kao **zbroj dva** koeficijenta:

- koeficijent uz **pretposljednji** član u p_n , što je a_{n-1} u jednom slučaju, a b_{n-1} u drugom,
- u **posljednjem** članu — u produktu faktora $\prod_{k=1}^n (x - x_k)$, uzmemo iz **jedne** zagrade $-x_k$, a iz **svih** ostalih x .

Izjednačavanjem koeficijenata dobivamo

$$a_{n-1} - a_n \sum_{k=0}^{n-1} x_k = b_{n-1} - b_n \sum_{k=1}^n x_k.$$

Uvažimo da je $a_n = b_n$

$$a_{n-1} - a_n \sum_{k=0}^{n-1} x_k = b_{n-1} - a_n \sum_{k=1}^n x_k.$$

Podijeljene razlike

Skratimo iste članove x_1, \dots, x_{n-1} u obje sume, pa ostaje

$$b_{n-1} - a_{n-1} = a_n(x_n - x_0),$$

ili

$$a_n = \frac{b_{n-1} - a_{n-1}}{x_n - x_0}.$$

Kad uvrstimo da je

$$a_n = f[x_0, \dots, x_n],$$

$$a_{n-1} = f[x_0, \dots, x_{n-1}],$$

$$b_{n-1} = f[x_n, \dots, x_1] = f[x_1, \dots, x_n],$$

odmah izlazi tražena **rekurzija**.

Start rekurzije je $f[x_k] = f_k$, što se vidi iz konstantnog interpolacijskog polinoma. ■

Tablica podijeljenih razlika

Tablica svih potrebnih podijeljenih razlika ima ovaj oblik:

x_k	$f[x_k]$	$f[x_k, x_{k+1}]$	$f[x_k, x_{k+1}, x_{k+2}]$	\cdots	$f[x_0, \dots, x_n]$
x_0	$f[x_0]$				
		$f[x_0, x_1]$			
x_1	$f[x_1]$		$f[x_0, x_1, x_2]$		
		$f[x_1, x_2]$		\ddots	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots		$f[x_0, \dots, x_n]$
		$f[x_{n-2}, x_{n-1}]$		\ddots	
x_{n-1}	$f[x_{n-1}]$		$f[x_{n-2}, x_{n-1}, x_n]$		
		$f[x_{n-1}, x_n]$			
x_n	$f[x_n]$				

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Konačni izgled Newtonovog interpolacijskog polinoma

$$\begin{aligned} p_n(x) = & f[x_0] + f[x_0, x_1] (x - x_0) \\ & + f[x_0, x_1, x_2] (x - x_0) (x - x_1) \\ & + \cdots + f[x_0, x_1, \dots, x_n] (x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}). \end{aligned}$$

Od tablice podijeljenih razlika treba nam samo “gornji rub”.
To se može **izračunati** u jednom **jednodimenzionalnom polju**.

Algoritam računanja podijeljenih razlika

```
za i = 1 do n radi {  
  za j = n do i radi {  
    f[j] = (f[j] - f[j - 1]) / (x[j] - x[j - i]);  
  };  
};
```

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Nakon završetka algoritma za računanje **podijeljenih razlika**

● “**gornji rub**” $f[x_0, \dots, x_i]$ se nalazi redom u polju **f**.

Algoritam **izvrednjavanja** interpolacijskog polinoma u nekoj točki x ima oblik **Hornerove sheme**.

Algoritam izvrednjavanja interpolacijskog polinoma

```
sum = f[n];  
za i = n - 1 do 0 radi {  
    sum = sum * (x - x[i]) + f[i];  
};  
/* Na kraju je p_n(x) = sum. */
```

Zapis greške interpolacijskog polinoma

Izraz za **grešku** interpolacijskog polinoma p_n na $[a, b]$ iz ranijeg **teorema**, možemo pisati korištenjem **podijeljenih razlika**.

Ideja. U **Newtonov** oblik polinoma p_n **dodajmo** još jedan čvor $x_{n+1} \in [a, b]$, s tim da x_{n+1} **nije** jednak ni jednom od polaznih čvorova x_0, \dots, x_n . Dobivamo polinom p_{n+1} za kojeg vrijedi

$$\begin{aligned} p_{n+1}(x) &= f[x_0] + f[x_0, x_1] (x - x_0) \\ &\quad + \dots + f[x_0, \dots, x_n] (x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}) \\ &\quad + f[x_0, \dots, x_n, x_{n+1}] (x - x_0) \cdots (x - x_n). \\ &= p_n(x) + (x - x_0) \cdots (x - x_n) f[x_0, \dots, x_n, x_{n+1}] \\ &= p_n(x) + \omega(x) f[x_0, \dots, x_n, x_{n+1}], \end{aligned}$$

gdje je ω polinom čvorova za **polazne** čvorove x_0, \dots, x_n .

Zapis greške interpolacijskog polinoma

Iz uvjeta interpolacije za polinom p_{n+1} u dodanom čvoru x_{n+1}

$$p_{n+1}(x_{n+1}) = f(x_{n+1}),$$

slijedi

$$f(x_{n+1}) = p_n(x_{n+1}) + \omega(x_{n+1}) f[x_0, \dots, x_{n+1}],$$

ili

$$f(x_{n+1}) - p_n(x_{n+1}) = \omega(x_{n+1}) f[x_0, \dots, x_{n+1}].$$

Ovo je **algebarski** identitet — tu nema nikakvih “čudesas”!

Usporedimo to s izrazom za **grešku** polinoma p_n iz ranijeg **teorema**, samo uvrstimo točku x_{n+1} , umjesto x ,

$$f(x_{n+1}) - p_n(x_{n+1}) = \frac{\omega(x_{n+1})}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi),$$

za neki $\xi \in (x_{\min}, x_{\max})$.

Veza podijeljene razlike i derivacije istog reda

Iz prethodne formule odmah čitamo da je

$$f[x_0, x_1, \dots, x_n, x_{n+1}] = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}.$$

Za $n = 0$, usporedite ovo s **Lagrangeovim** teoremom srednje vrijednosti, ili odnosom “**sekanta**” \leftrightarrow “**tangenta**”!

Gornja formula je **generalizacija** za $n \geq 1$ (za više derivacije).

U izrazu za **grešku** interpolacije, ova se formula uobičajeno piše u ovisnosti o varijabli x , tj. x_{n+1} se “vrati” u x , pa je

$$f[x_0, x_1, \dots, x_n, x] = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}.$$

Zanimljivo je da ova formula **vrijedi** i kad čvorovi **nisu** međusobno **različiti** (v. Hermiteova interpolacija).

Podijeljene razlike visokog reda za polinome

Iz formule

$$f[x_0, x_1, \dots, x_n, x_{n+1}] = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

direktno izlazi još i ovaj rezultat.

Korolar. Ako je $f \in \mathcal{P}_n$ **polinom** stupnja najviše n , onda je

$$f[x_0, x_1, \dots, x_k] = 0, \quad \text{za } k \geq n + 1,$$

za **bilo koji** izbor čvorova x_0, \dots, x_k .

Dokaz. Za $k \geq n + 1$ vrijedi $f^{(k)}(\xi) = 0$ u **svakoj** točki ξ . ■

Newtonov oblik IP za ekvidistantne čvorove

Newtonov oblik — ekvidistantni čvorovi

Newtonova forma interpolacijskog polinoma može se pojednostavniti

ako su čvorovi ekvidistantni.

Prisjetimo se, Newtonov interpolacijski polinom izgleda ovako:

$$\begin{aligned} p_n(x) = & f[x_0] + f[x_0, x_1] (x - x_0) \\ & + f[x_0, x_1, x_2] (x - x_0) (x - x_1) \\ & + \cdots + f[x_0, x_1, \dots, x_n] (x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}). \end{aligned}$$

Pojednostavljenje računanja radi se u

podijeljenim razlikama $f[x_0, x_1, \dots, x_k]$,

faktoru $(x - x_0) \cdots (x - x_{k-1}) = \prod_{j=0}^{k-1} (x - x_j)$.

Ekvidistantni čvorovi — konačne razlike

Pojednostavnimo prvo **podijeljenu razliku**.

Točke su **ekvidistantne** s “razmakom” (ili korakom) h , ako je

$$x_j = x_0 + j \cdot h, \quad j = 0, \dots, n.$$

Konačnu razliku unaprijed definiramo kao

$$\Delta f_j = f_{j+1} - f_j.$$

Operator Δ zovemo **operator konačnih razlika unaprijed**.

Konačnu razliku reda k , za $k \in \mathbb{N}$, definiramo **rekurzivno** kao

$$\Delta^k f_j = \Delta^{k-1} f_{j+1} - \Delta^{k-1} f_j,$$

uz dogovor (definiciju) $\Delta^0 f_j = f_j$.

Podijeljene i konačne razlike

Nađimo vezu **podijeljenih** i **konačnih** razlika.

Lema. Ako su točke x_j **ekvidistantne**, za bilo koji $k \geq 0$ vrijedi

$$f[x_j, \dots, x_{j+k}] = \frac{1}{k! h^k} \Delta^k f_j.$$

Dokaz. Ide indukcijom po redu k .

Za $k = 0$, rezultat je očito istinit — po definiciji.

Baza indukcije. Za $k = 1$ imamo

$$f[x_j, x_{j+1}] = \frac{f_{j+1} - f_j}{x_{j+1} - x_j} = \frac{\Delta f_j}{h},$$

pa tvrdnja vrijedi za $k = 1$.

Podijeljene i konačne razlike

Korak indukcije. Pretpostavimo da za sve uzastopne točke x_j, \dots, x_{j+k-1} , za bilo koji “dozvoljeni” j , vrijedi

$$f[x_j, \dots, x_{j+k-1}] = \frac{1}{(k-1)! h^{k-1}} \Delta^{k-1} f_j.$$

Zaključak. Ako je $j+k \leq n$, onda je

$$\begin{aligned} f[x_j, \dots, x_{j+k}] &= \frac{f[x_{j+1}, \dots, x_{j+k}] - f[x_j, \dots, x_{j+k-1}]}{x_{j+k} - x_j} \\ &= \frac{f[x_{j+1}, \dots, x_{j+k}] - f[x_j, \dots, x_{j+k-1}]}{k \cdot h} = (\text{pretp. ind.}) \\ &= \frac{1}{kh} \left(\frac{1}{(k-1)! h^{k-1}} \Delta^{k-1} f_{j+1} - \frac{1}{(k-1)! h^{k-1}} \Delta^{k-1} f_j \right) \\ &= \frac{1}{k! h^k} (\Delta^{k-1} f_{j+1} - \Delta^{k-1} f_j) = \frac{1}{k! h^k} \Delta^k f_j. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Ekvidistantni čvorovi — Newtonova baza

Pojednostavnimo još faktor $(x - x_0) \cdots (x - x_{k-1})$.

Zapišimo prvo točku x preko početnog čvora x_0 i koraka h ,

$$x = x_0 + s \cdot h.$$

s tim da s može biti i realan broj. Tada je

$$x - x_j = x_0 + s \cdot h - (x_0 + j \cdot h) = (s - j)h,$$

pa je

$$\prod_{j=0}^{k-1} (x - x_j) = \prod_{j=0}^{k-1} ((s - j)h) = h^k \prod_{j=0}^{k-1} (s - j).$$

Ekvidistantni čvorovi — Newtonova baza

Po definiciji **binomnih koeficijenata**, s tim da **smije** biti i $s \in \mathbb{R}$, imamo

$$\binom{s}{0} = 1, \quad \binom{s}{k} = \frac{s(s-1)\cdots(s-k+1)}{k!}, \quad k > 0.$$

Odavde odmah slijedi da je

$$h^k \prod_{j=0}^{k-1} (s-j) = h^k k! \binom{s}{k}.$$

Sada možemo napisati **Newtonov** oblik interpolacijskog polinoma s **ekvidistantnim čvorovima**.

Newtonov oblik — ekvidistantni čvorovi

Uočimo da se faktor $h^k k!$ skrati:

• u nazivniku dolazi od konačnih razlika,

• a u brojniku od produkta $\prod_{j=0}^{k-1} (x - x_j)$,

pa interpolacijski polinom izgleda ovako:

$$\begin{aligned} p_n(x) &= f[x_0] + f[x_0, x_1] (x - x_0) \\ &\quad + f[x_0, x_1, x_2] (x - x_0) (x - x_1) \\ &\quad + \cdots + f[x_0, x_1, \dots, x_n] (x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}) \\ &= \Delta^0 f_0 + \binom{s}{1} \Delta^1 f_0 + \cdots + \binom{s}{n} \Delta^n f_0, \end{aligned}$$

pri čemu je

$$x = x_0 + s \cdot h.$$

Ekvidistantni čvorovi — tablica konačnih razlika

Tablica svih potrebnih konačnih razlika ima ovaj oblik:

x_k	f_k	Δf_k	$\Delta^2 f_k$	\dots	$\Delta^n f_k$
x_0	f_0				
x_1	f_1	Δf_0	$\Delta^2 f_0$		
\vdots	\vdots	Δf_1	\vdots	\ddots	
x_{n-1}	f_{n-1}	Δf_{n-2}	$\Delta^2 f_{n-2}$	\ddots	$\Delta^n f_0$
x_n	f_n	Δf_{n-1}			

Ova tablica se računa u jednom jednodimenzionalnom polju, kao i kod podijeljenih razlika.

**Koliko je “dobar”
interpolacijski polinom?**

Koliko je dobar interpolacijski polinom?

U praksi se obično koriste

- interpolacijski polinomi **niskih** stupnjeva — do 5.

Zašto?

Za neke **funkcije** i za neke izbore **točaka** interpolacije, **povećavanje stupnja** interpolacijskog polinoma

- može dovesti do **povećanja grešaka**.

Promotrimo nekoliko karakterističnih primjera. **Legenda:**

- crna boja — **funkcija f** ,
- **crvena** boja — **interpolacijski polinom p_n** .

Ekvidistantna mreža s $n + 1$ čvorova u intervalu $[a, b]$ ima čvorove $x_k^{(n)} = a + k \cdot h_n$, za $k = 0, \dots, n$, uz $h_n = (b - a)/n$.

Primjer — logaritamska funkcija

Promotrimo **grafove** interpolacijskih polinoma stupnjeva 1–6 koji interpoliraju funkciju

$$f(x) = \log_{10}(x)$$

na **ekvidistantnoj mreži** za $x \in [0.1, 10]$.

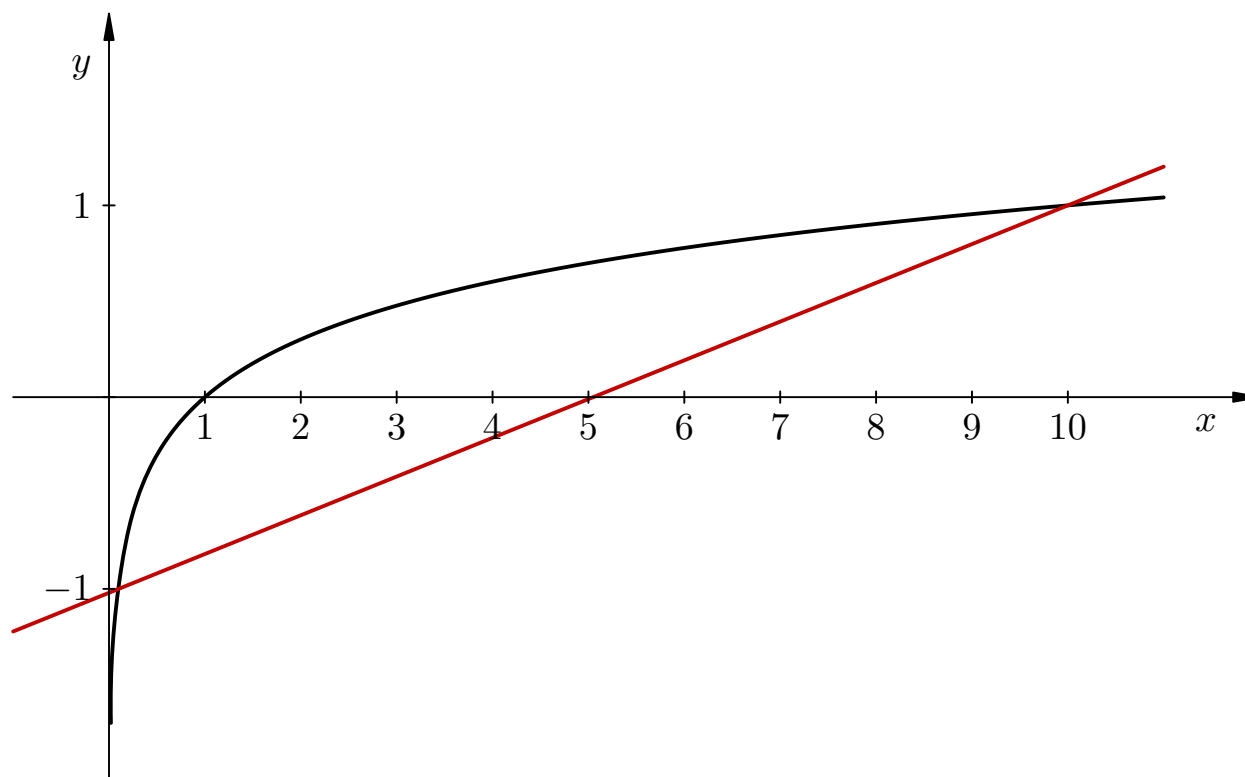
Primijetit ćete da je **greška** interpolacije

● **najveća** na **prvom** intervalu.

Razlog: funkcija $\log_{10}(x)$ ima **singularitet** u 0, a početna točka interpolacije 0.1 je **vrlo blizu** tog singulariteta.

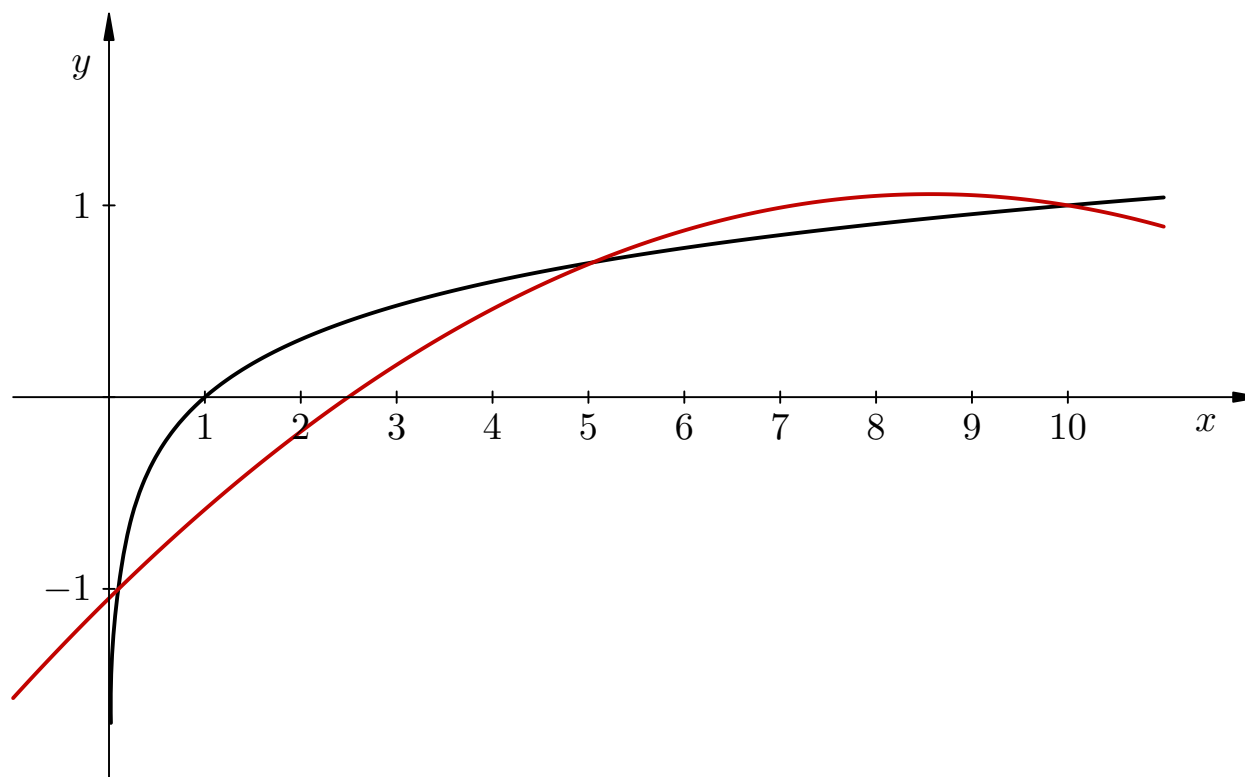
Nadalje, promotrite kako se interpolacijski polinom ponaša **izvan** intervala interpolacije (tzv. “**ekstrapolacija**”).

Logaritam — ekvidistantna mreža



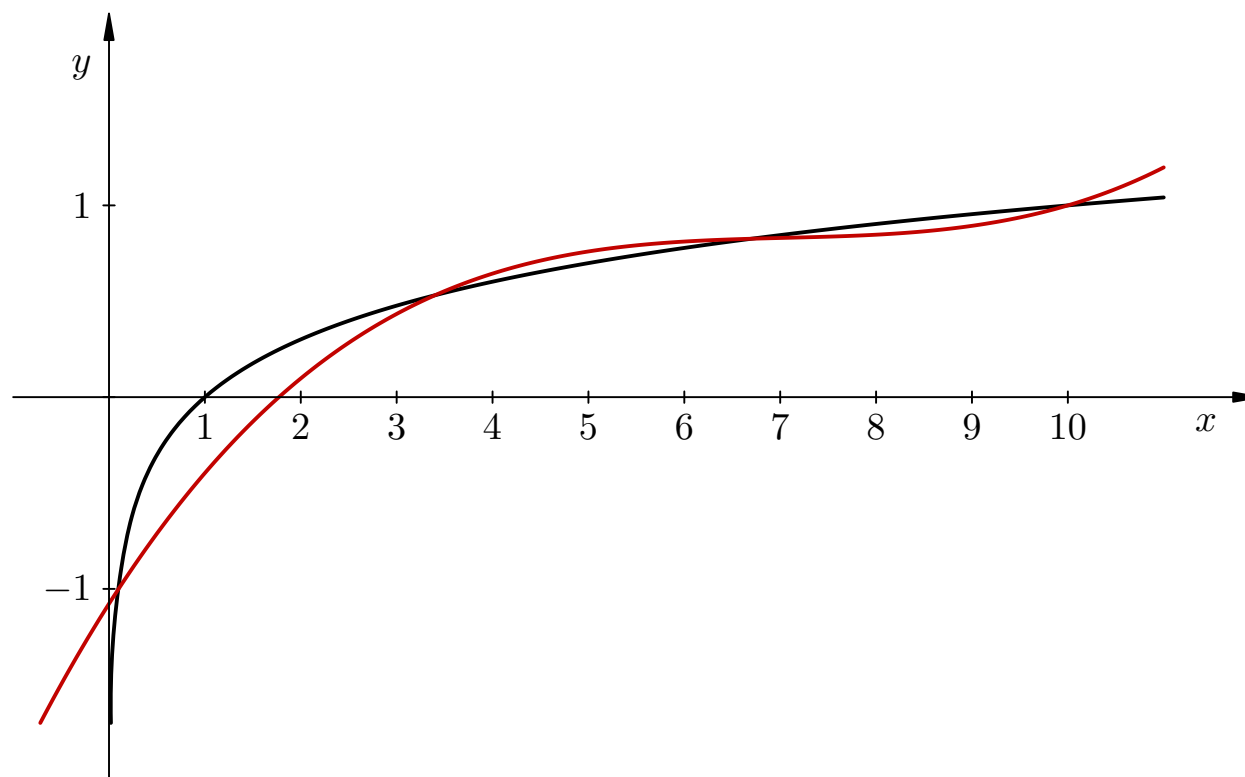
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 1.

Logaritam — ekvidistantna mreža



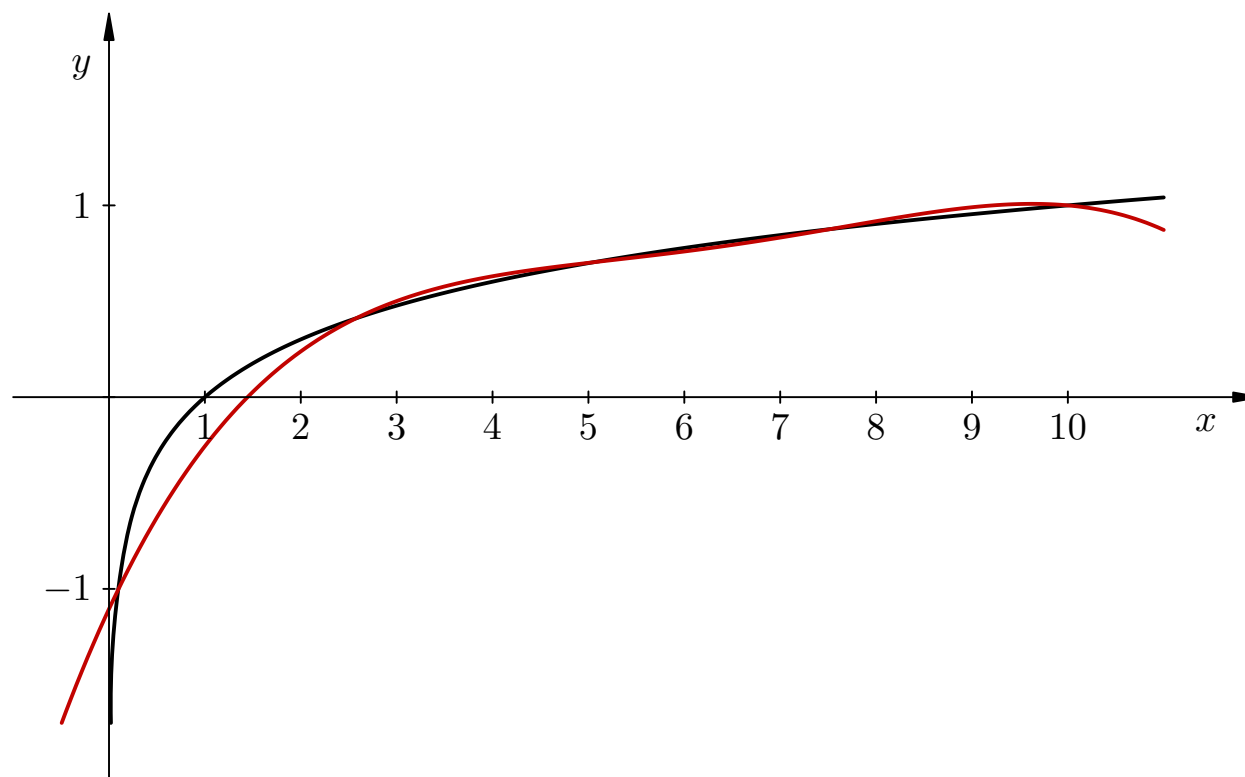
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 2.

Logaritam — ekvidistantna mreža



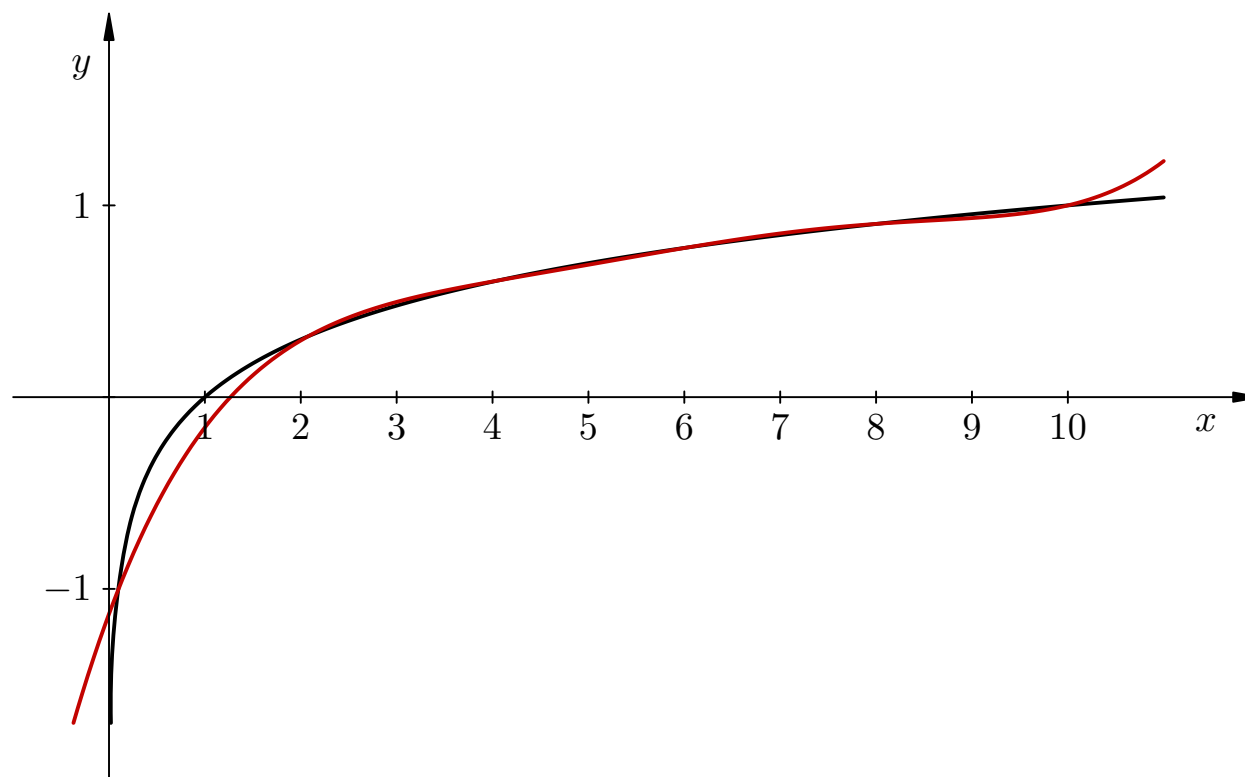
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 3.

Logaritam — ekvidistantna mreža



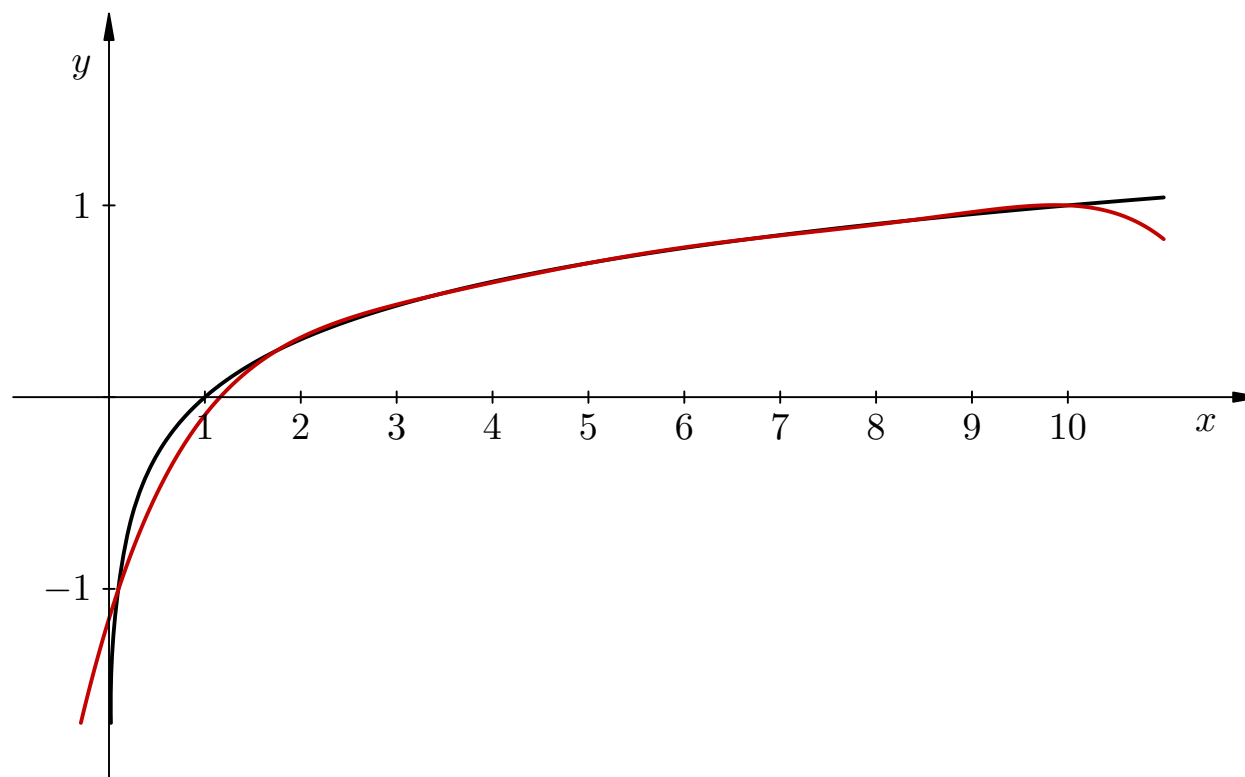
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 4.

Logaritam — ekvidistantna mreža



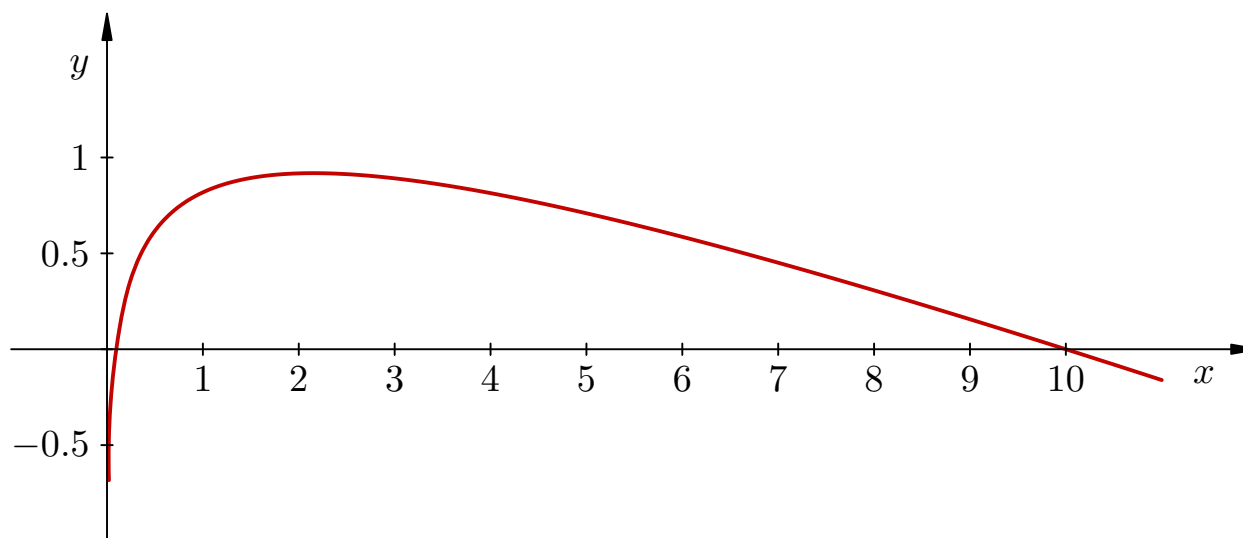
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 5.

Logaritam — ekvidistantna mreža



Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 6.

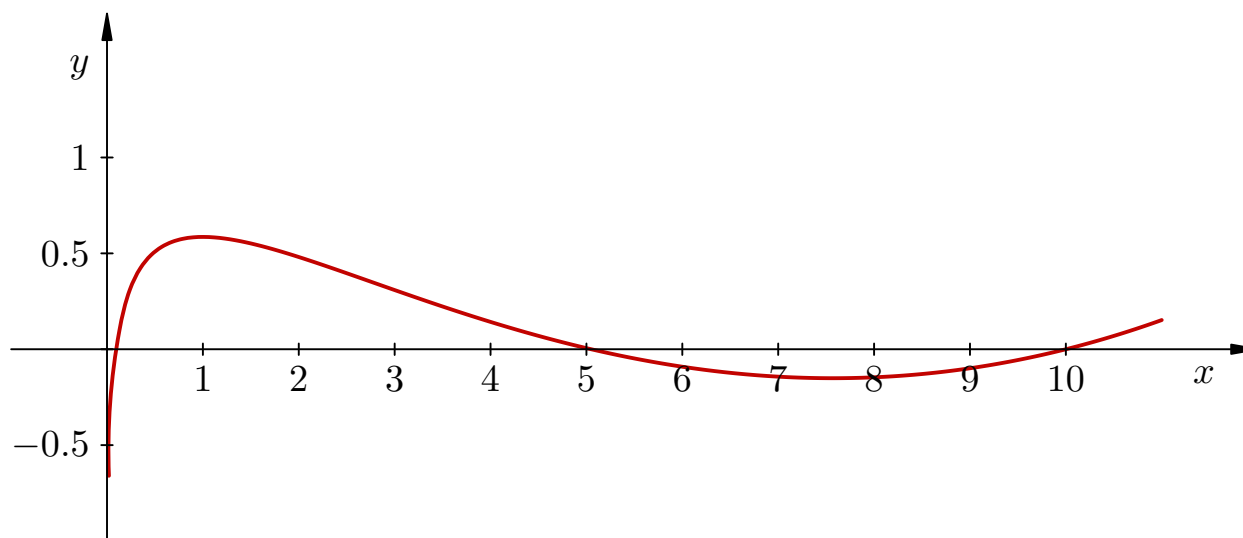
Logaritam — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 1.

Pratite *skalu* na *y*-osi.

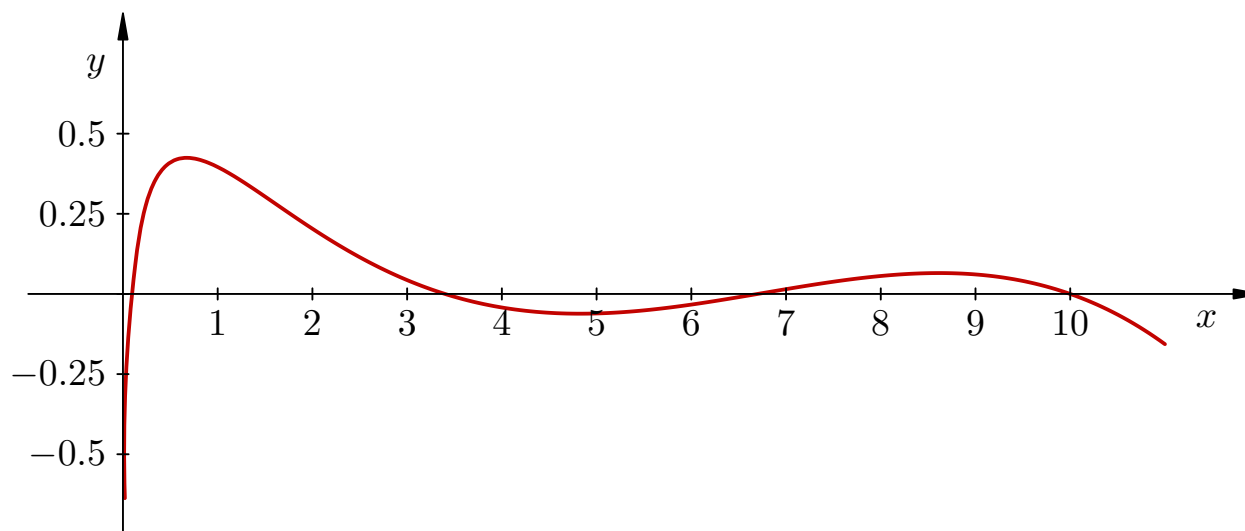
Logaritam — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 2.

Pratite **skalu** na y -osi.

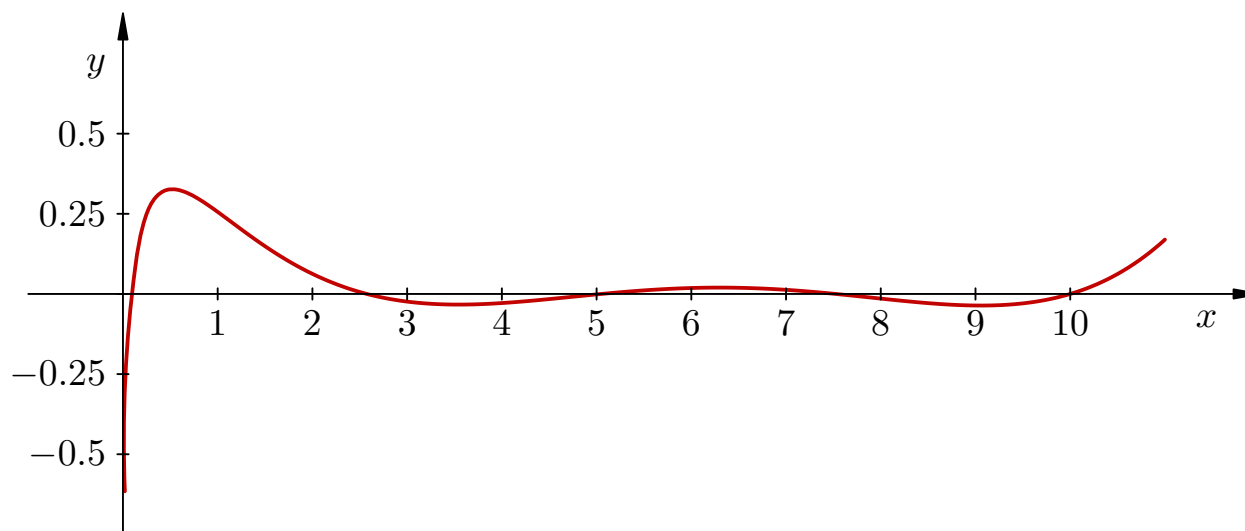
Logaritam — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 3.

Pratite *skalu* na *y*-osi.

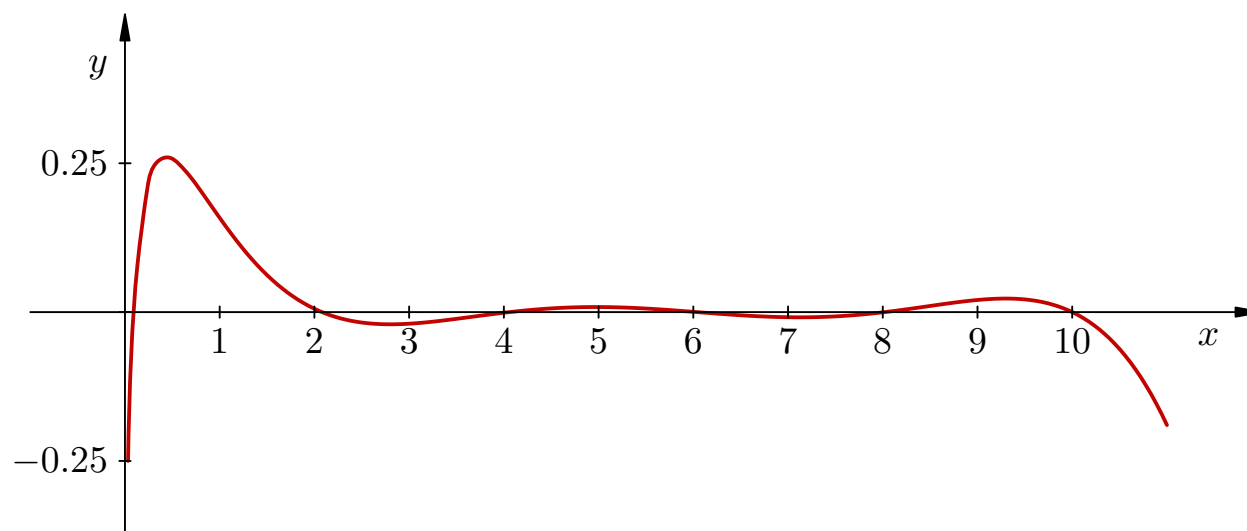
Logaritam — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 4.

Pratite *skalu* na *y*-osi.

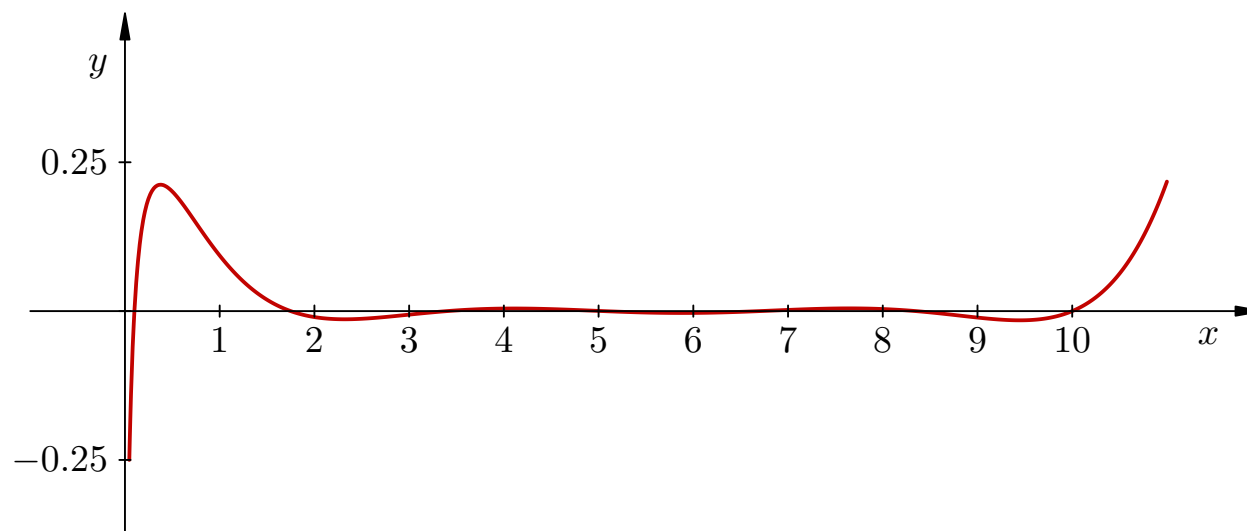
Logaritam — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 5.

Pratite *skalu* na *y*-osi.

Logaritam — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 6.

Pratite *skalu* na *y*-osi.

Primjer Runge

Njemački matematičar **Runge** (1901. g.) prvi je uočio

- probleme koji nastupaju kod interpolacije **polinomima** na **ekvidistantnim** mrežama čvorova.
- Konstruirao je funkciju — poznatu kao **funkcija Runge**

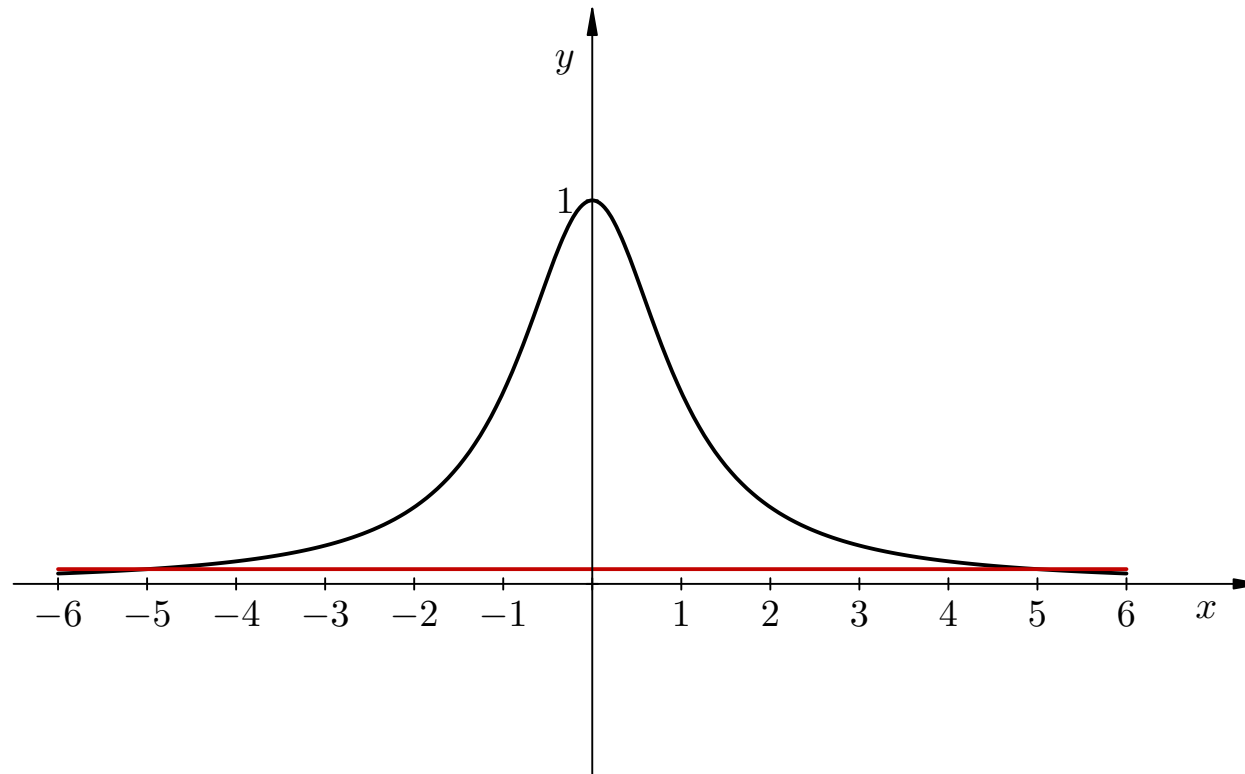
$$f(x) = \frac{1}{1+x^2}, \quad \text{na } [-5, 5],$$

takvu da **niz** interpolacijskih polinoma na **ekvidistantnim** mrežama **ne konvergira** prema toj funkciji.

Promotrimo interpolaciju polinomima stupnjeva

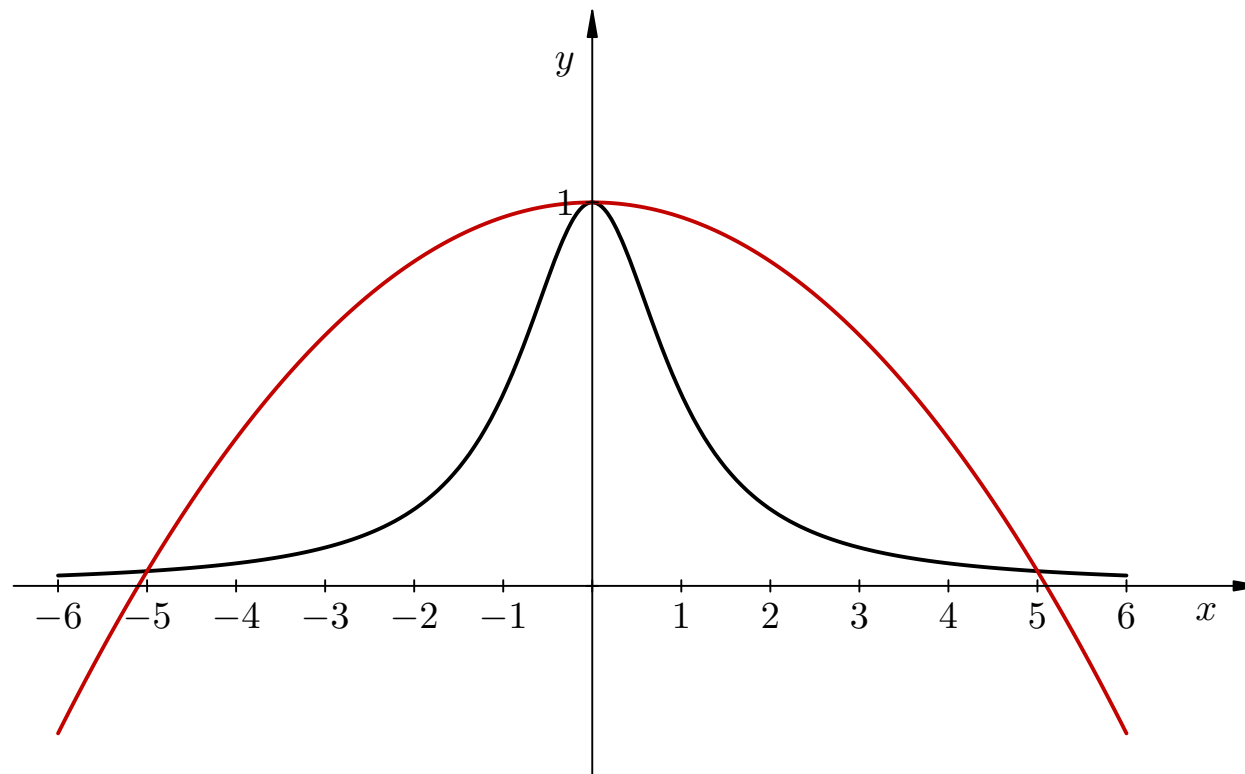
- 1–6, 8, 10, 12, 14 i 16 (parnost funkcije!),
na **ekvidistantnim** mrežama čvorova u $[-5, 5]$.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



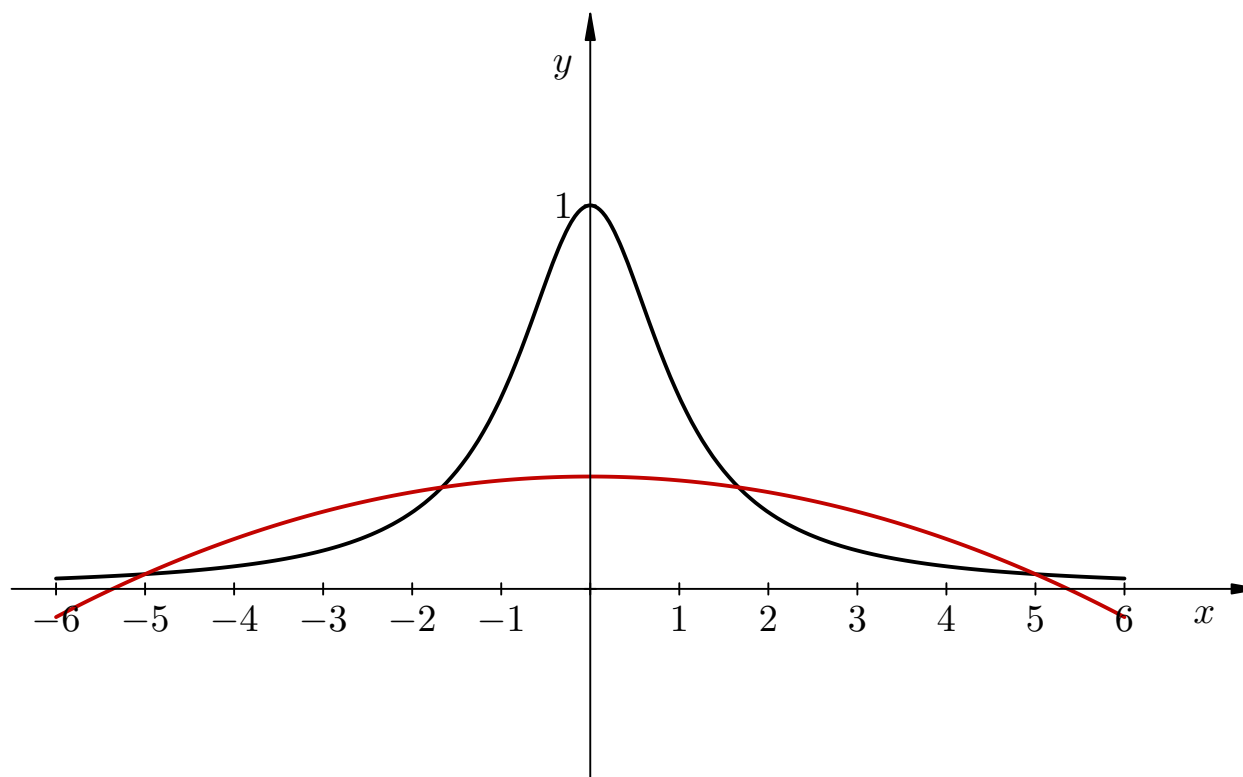
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 1.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



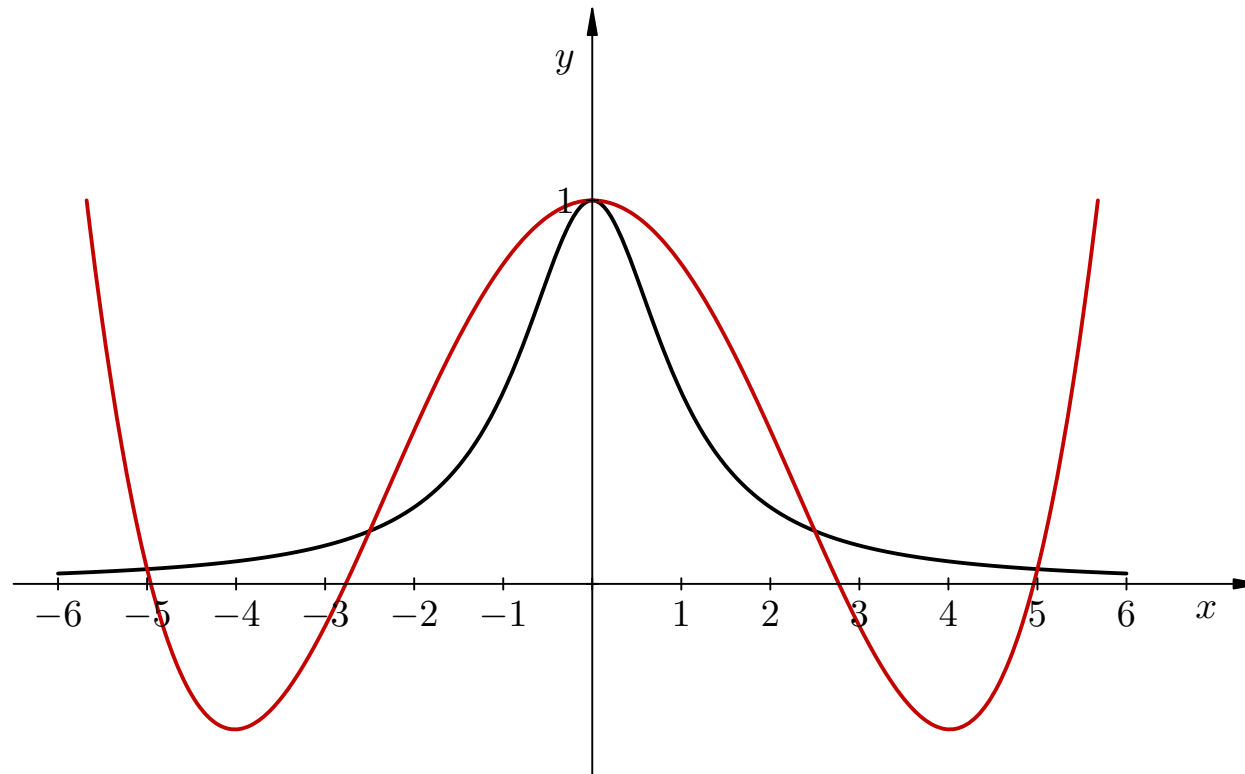
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 2.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



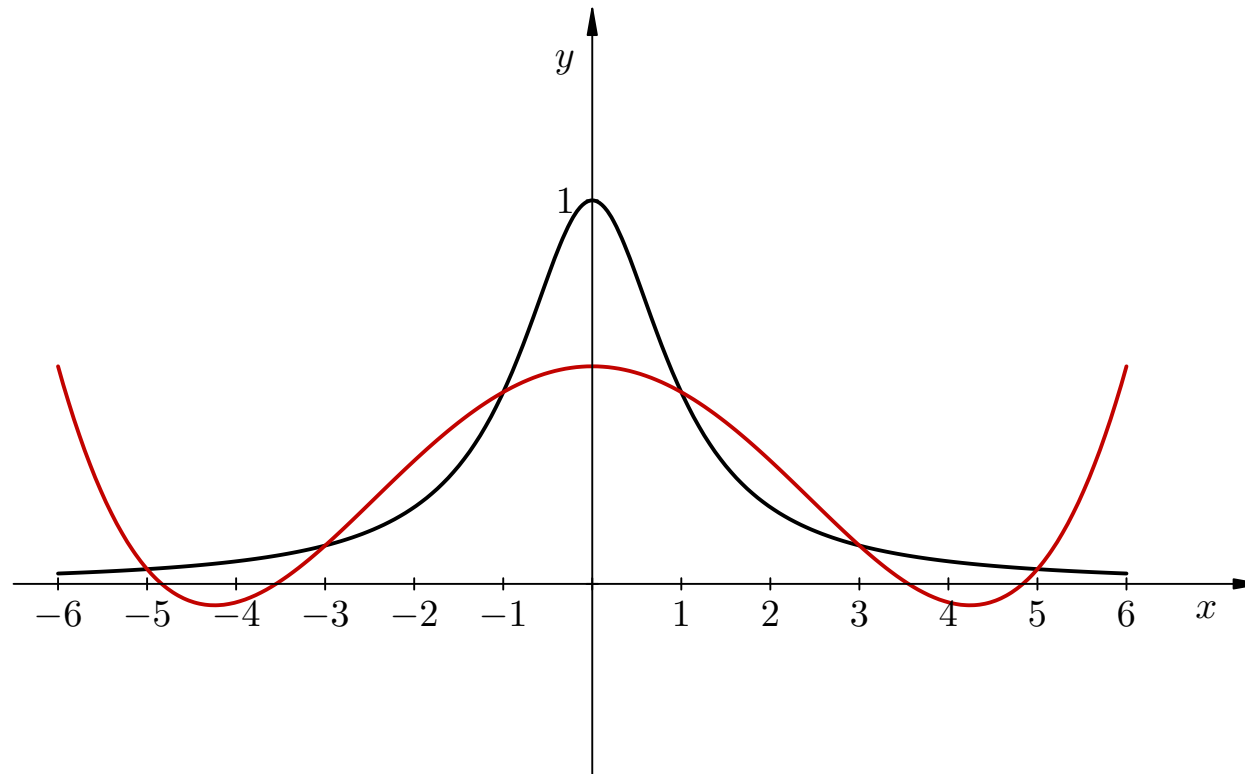
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 3.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



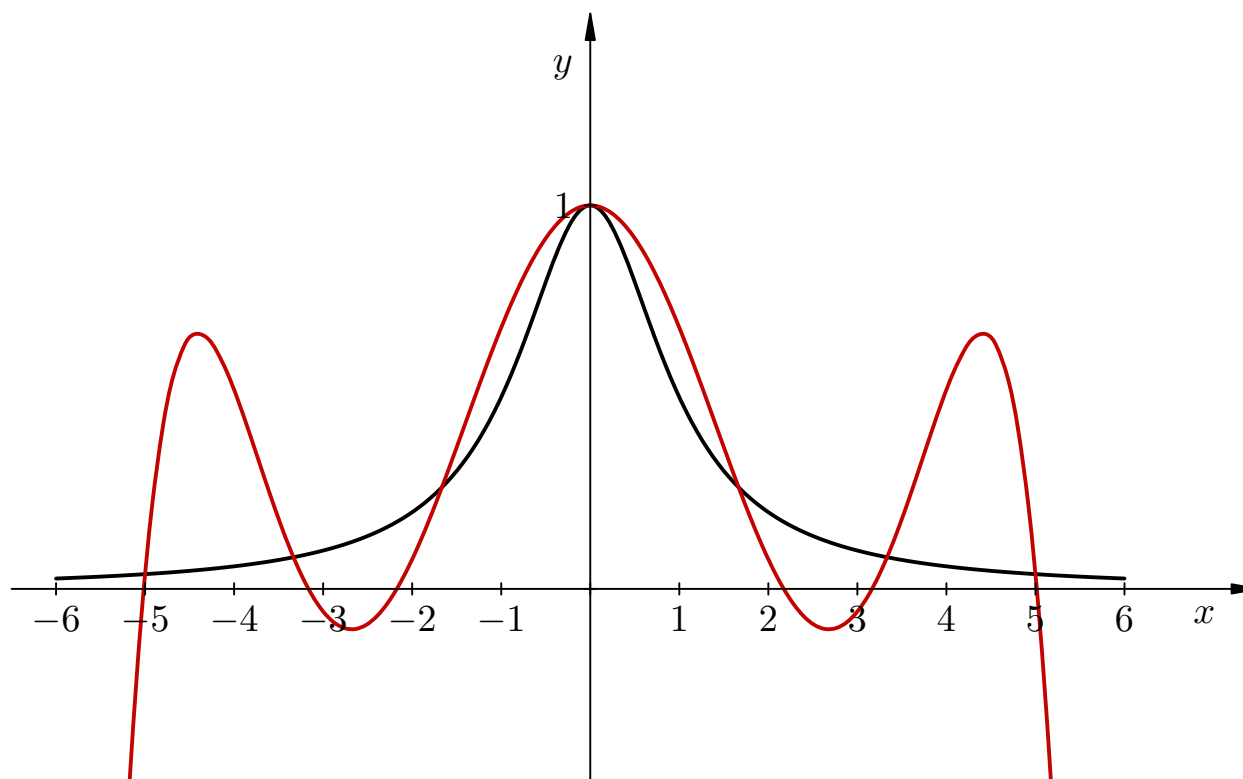
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 4.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



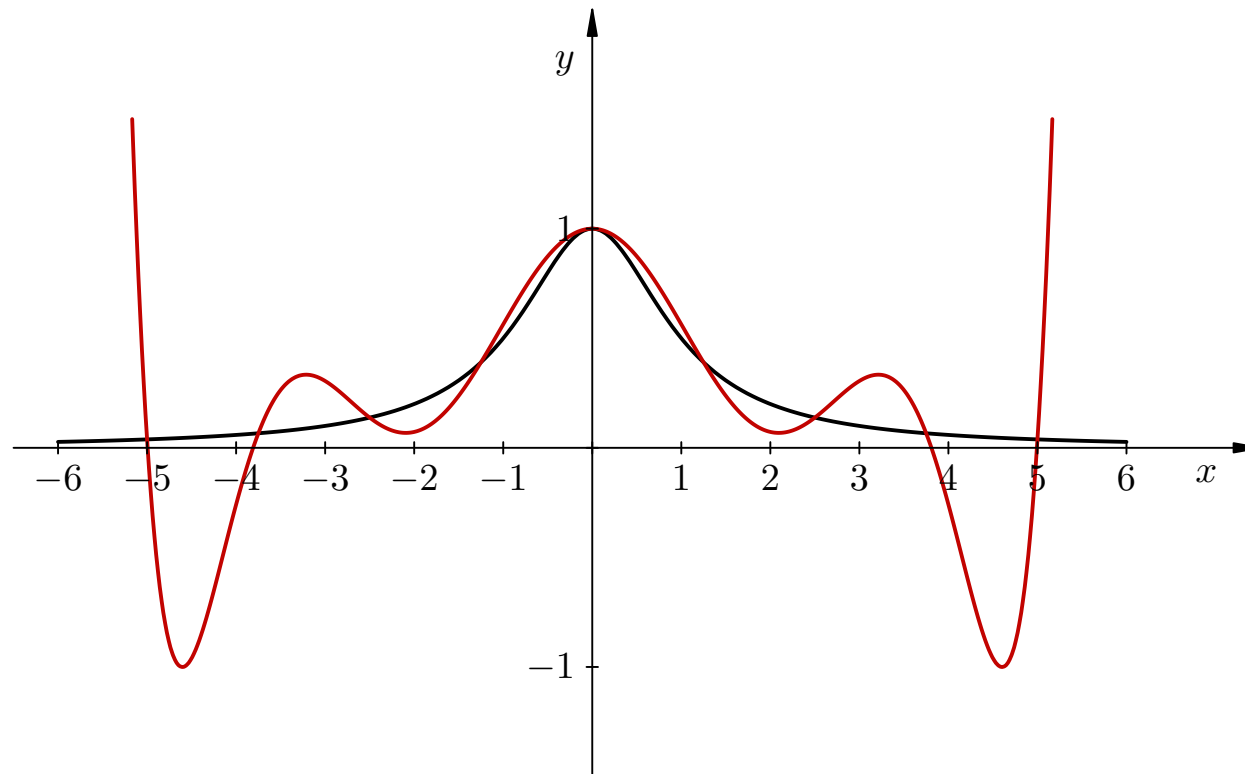
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 5.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



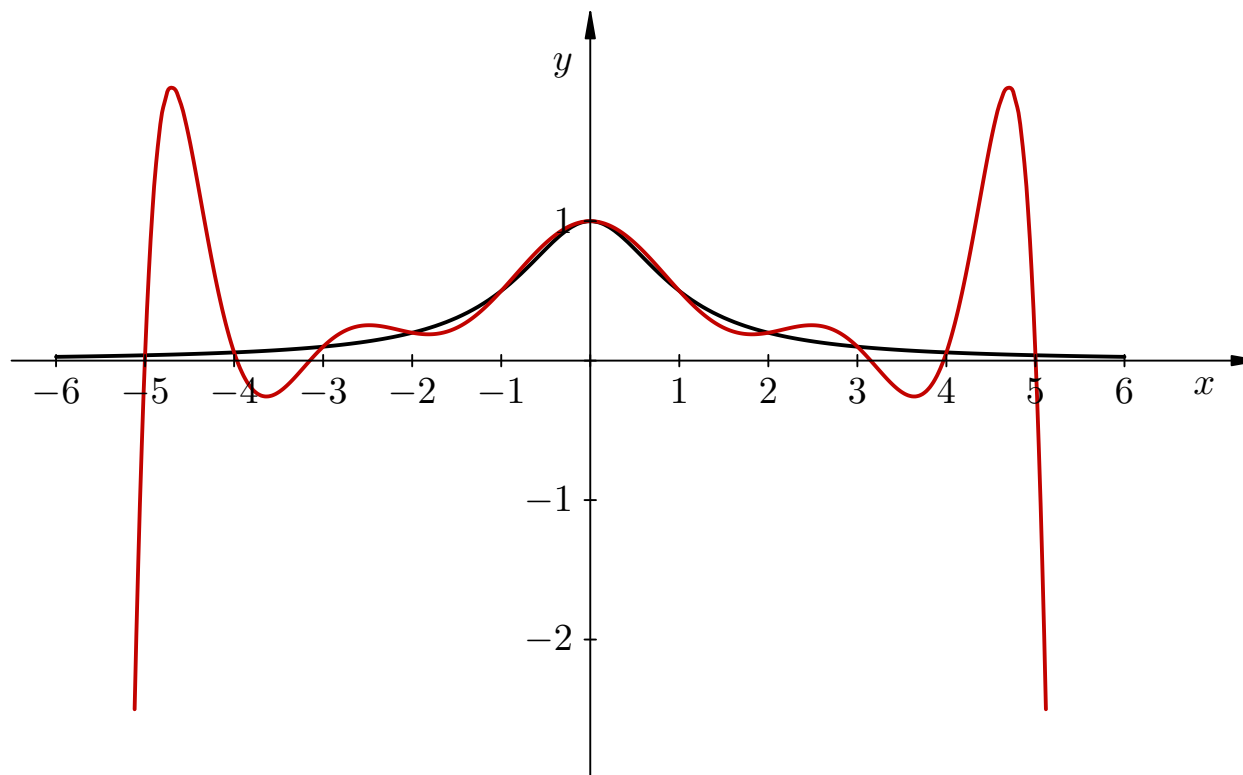
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 6.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



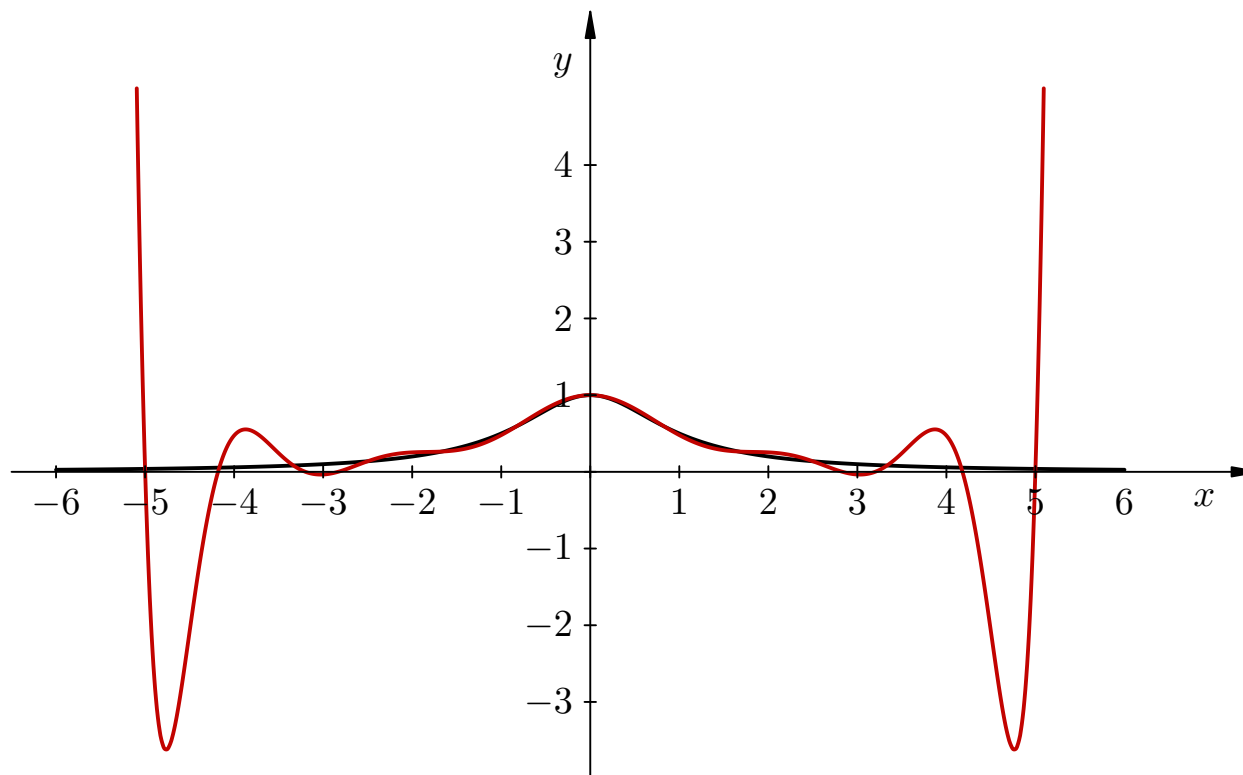
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 8.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



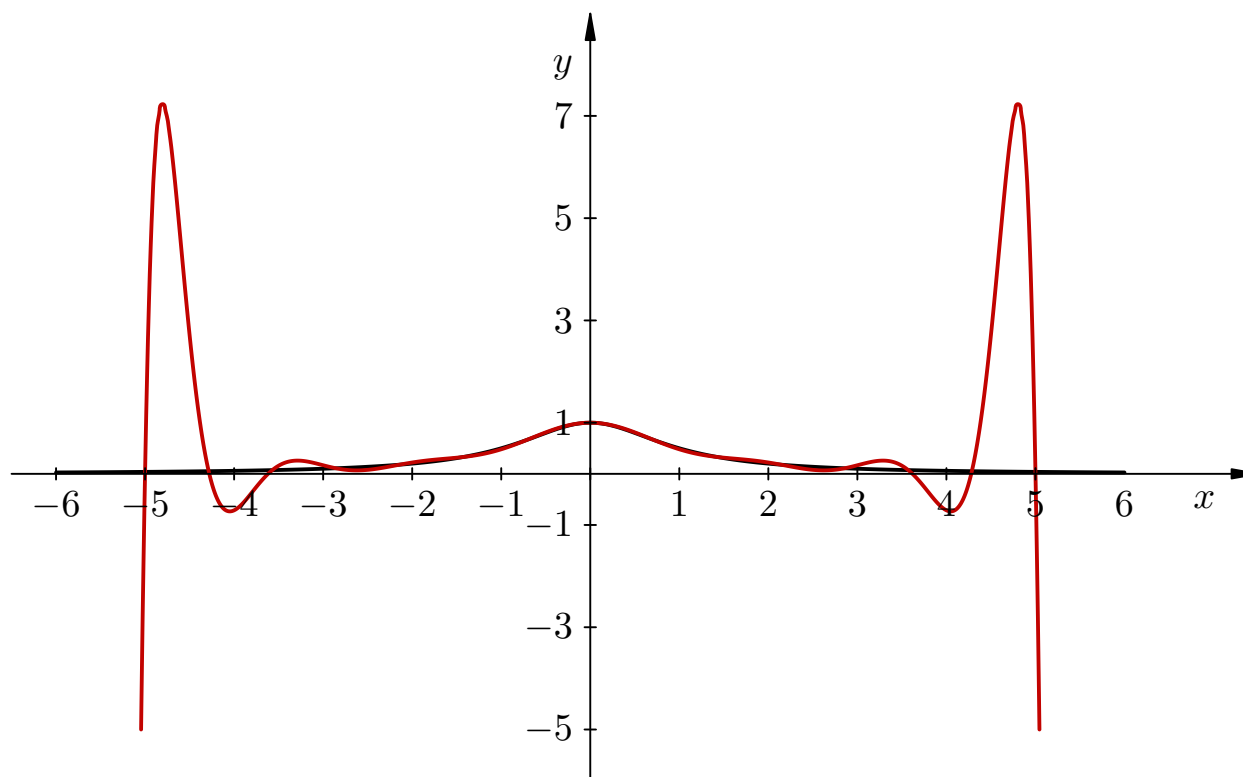
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 10.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



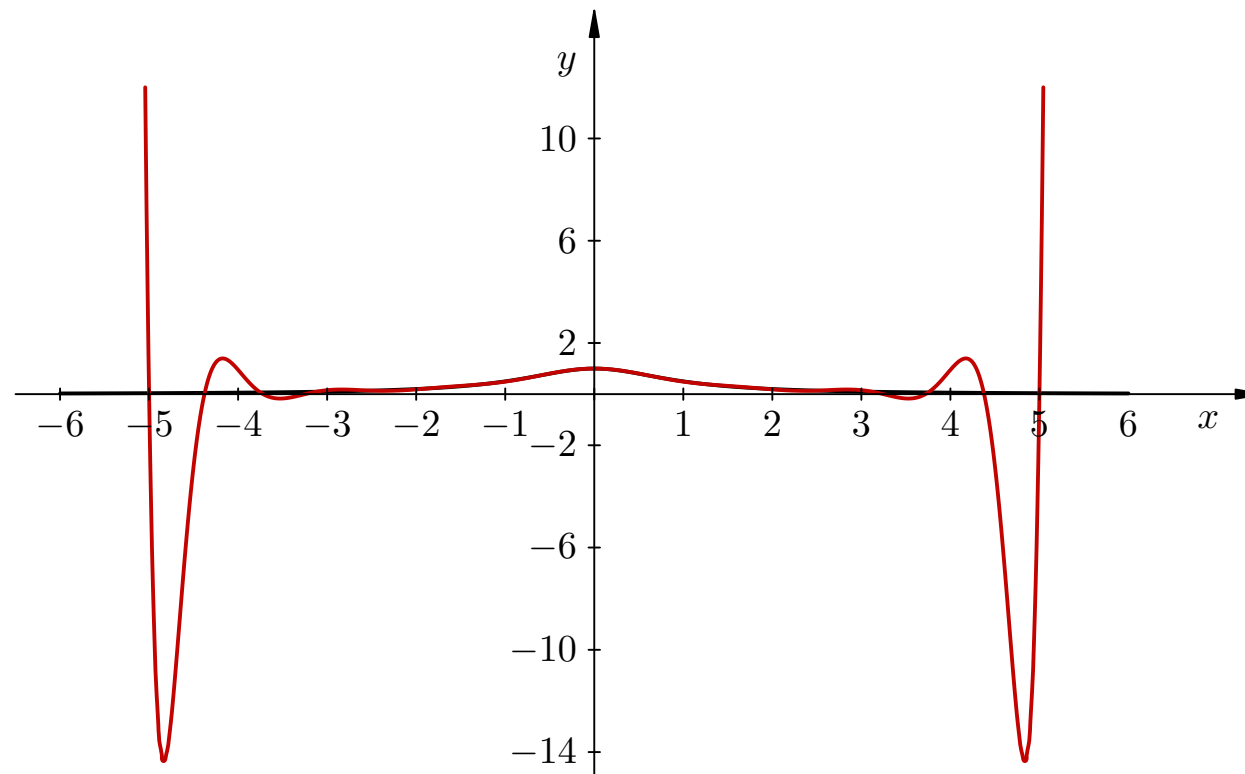
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 12.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



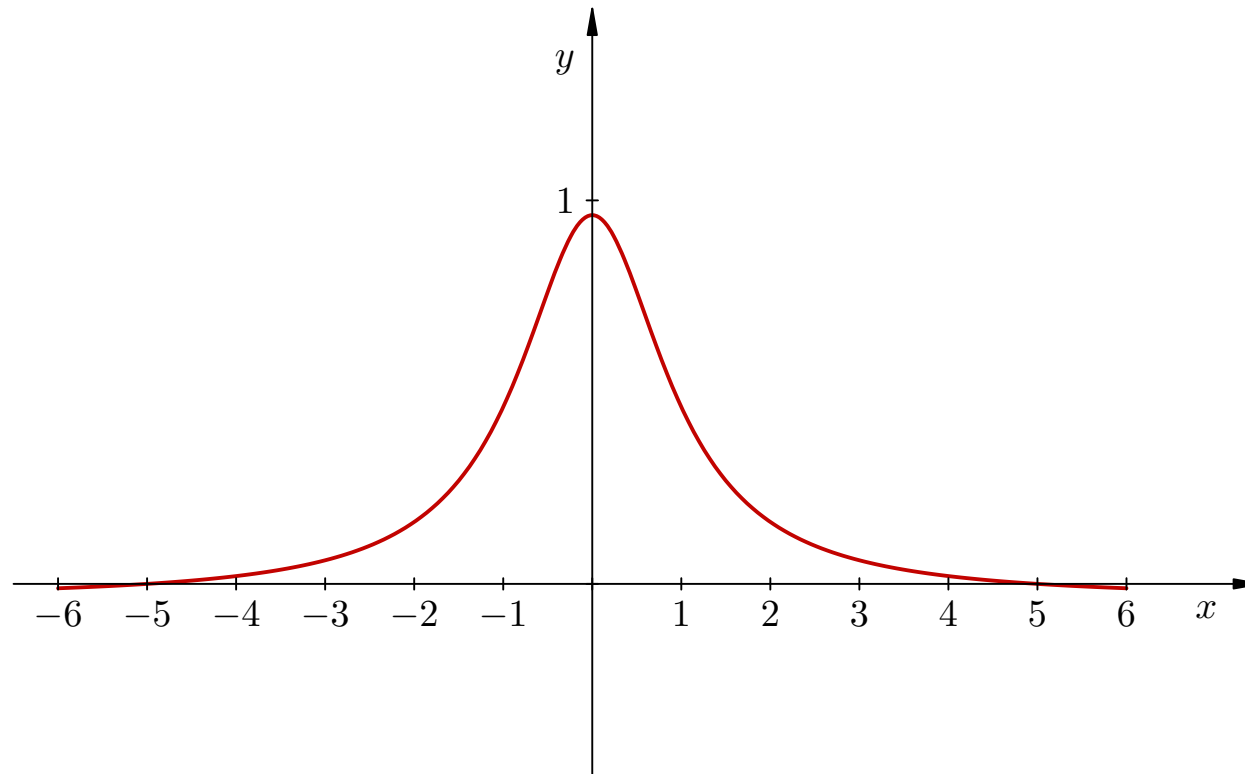
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 14.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža



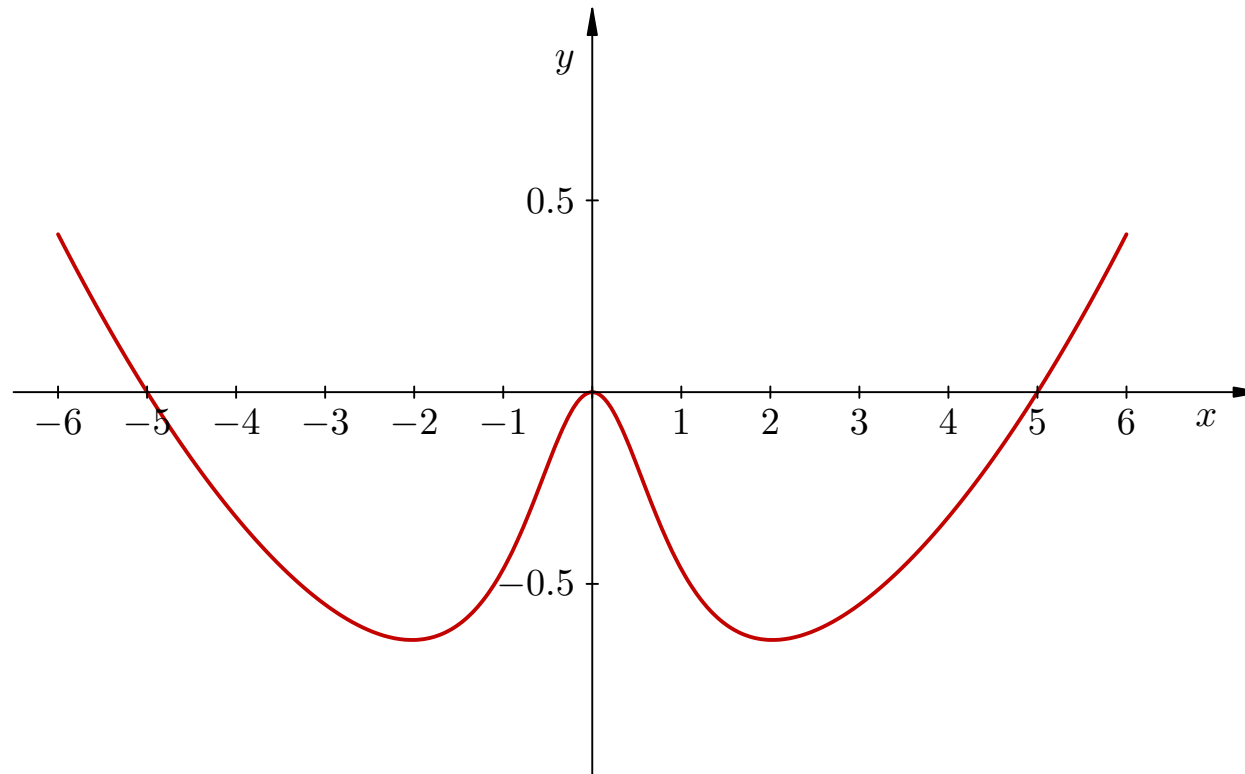
Ekvidistantna mreža,
interpolacijski polinom stupnja 16.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



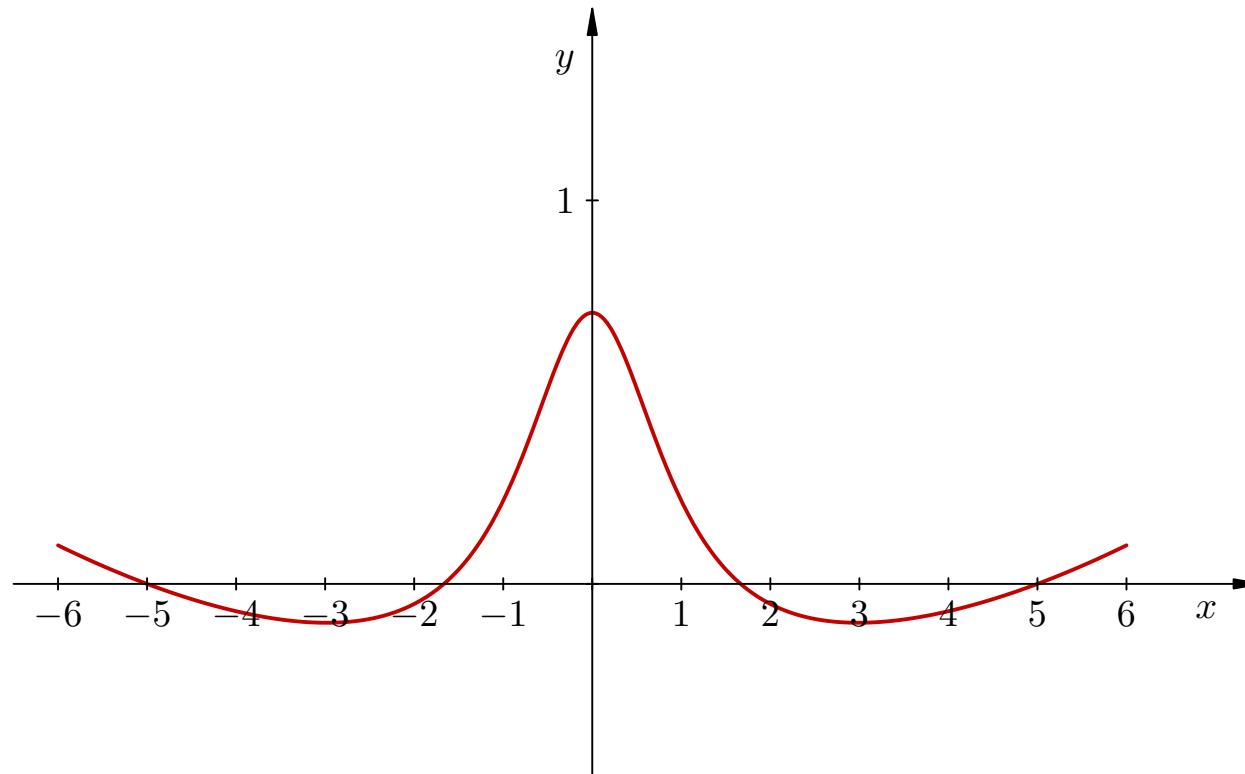
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 1.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



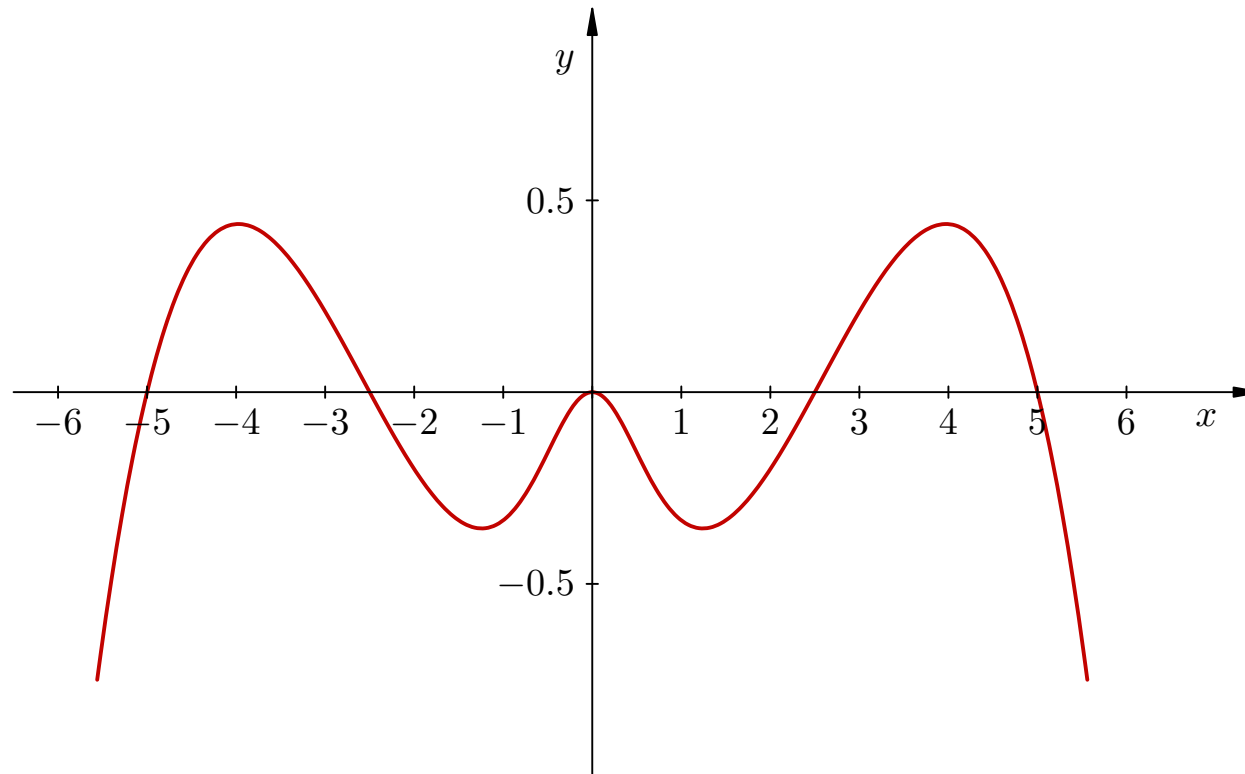
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 2.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



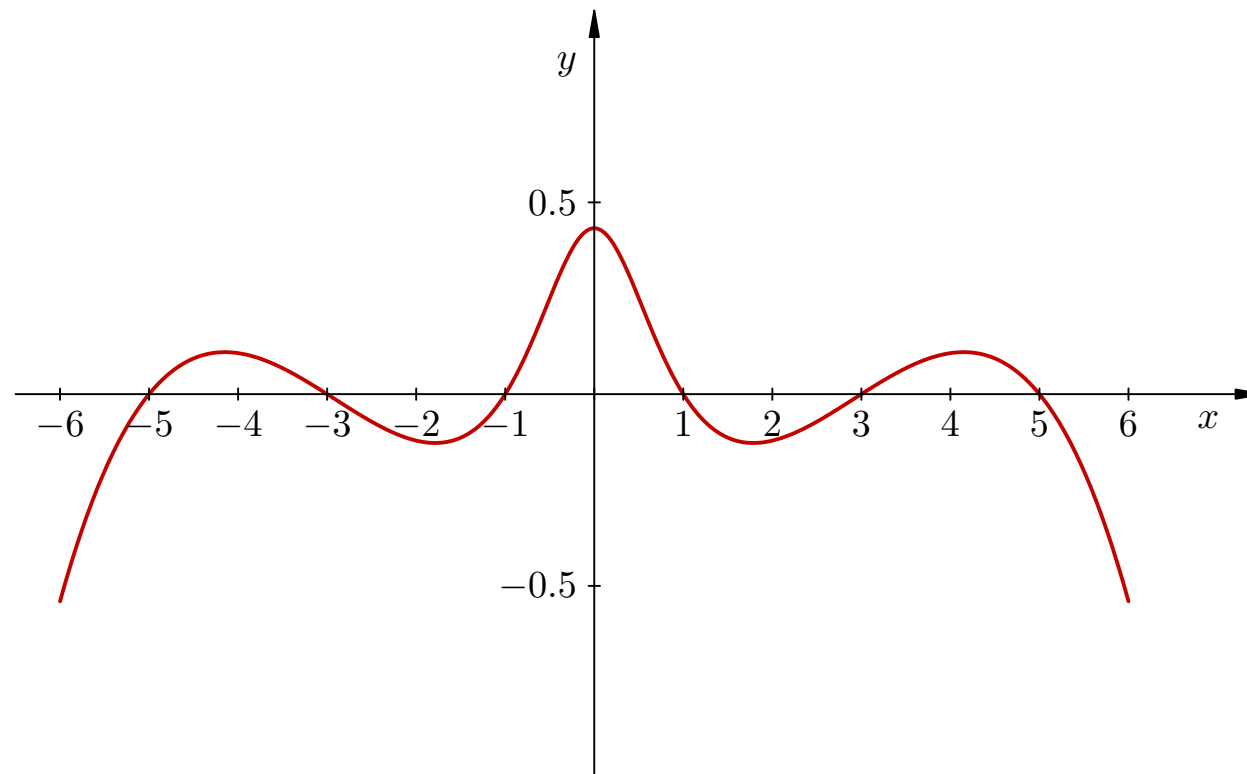
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 3.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



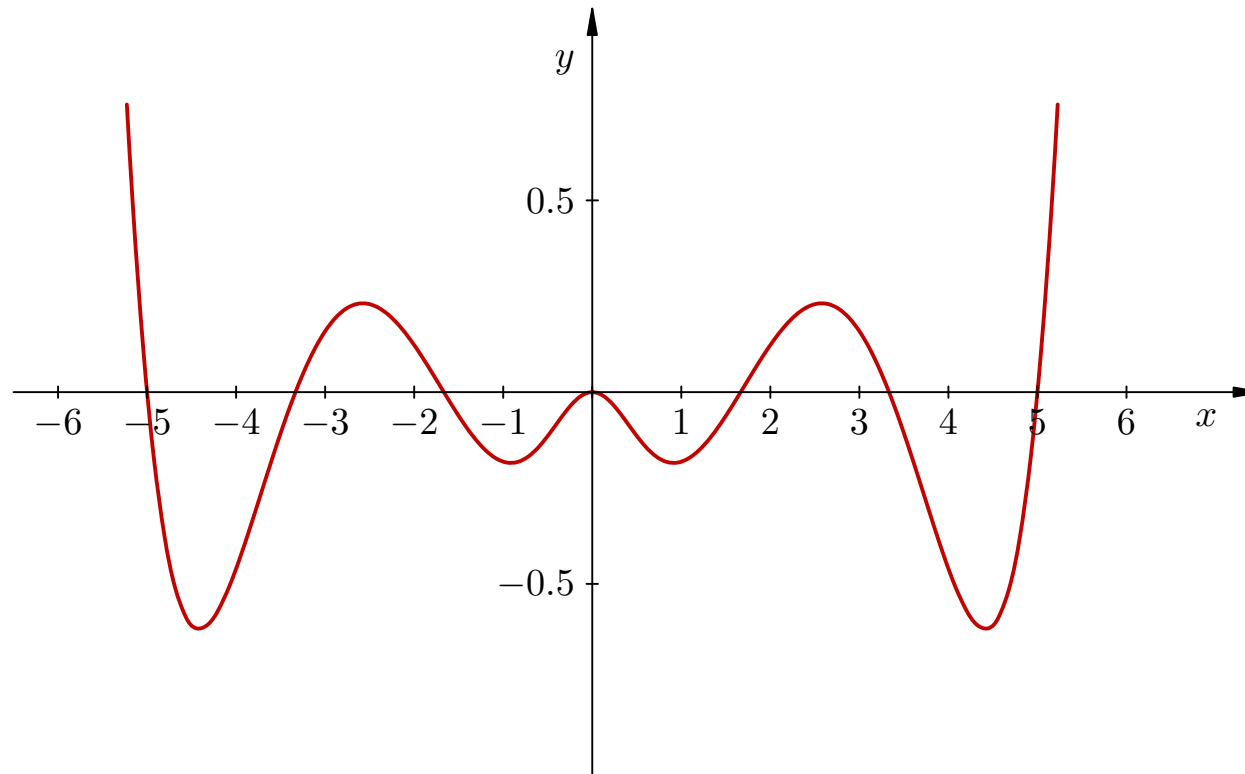
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 4.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



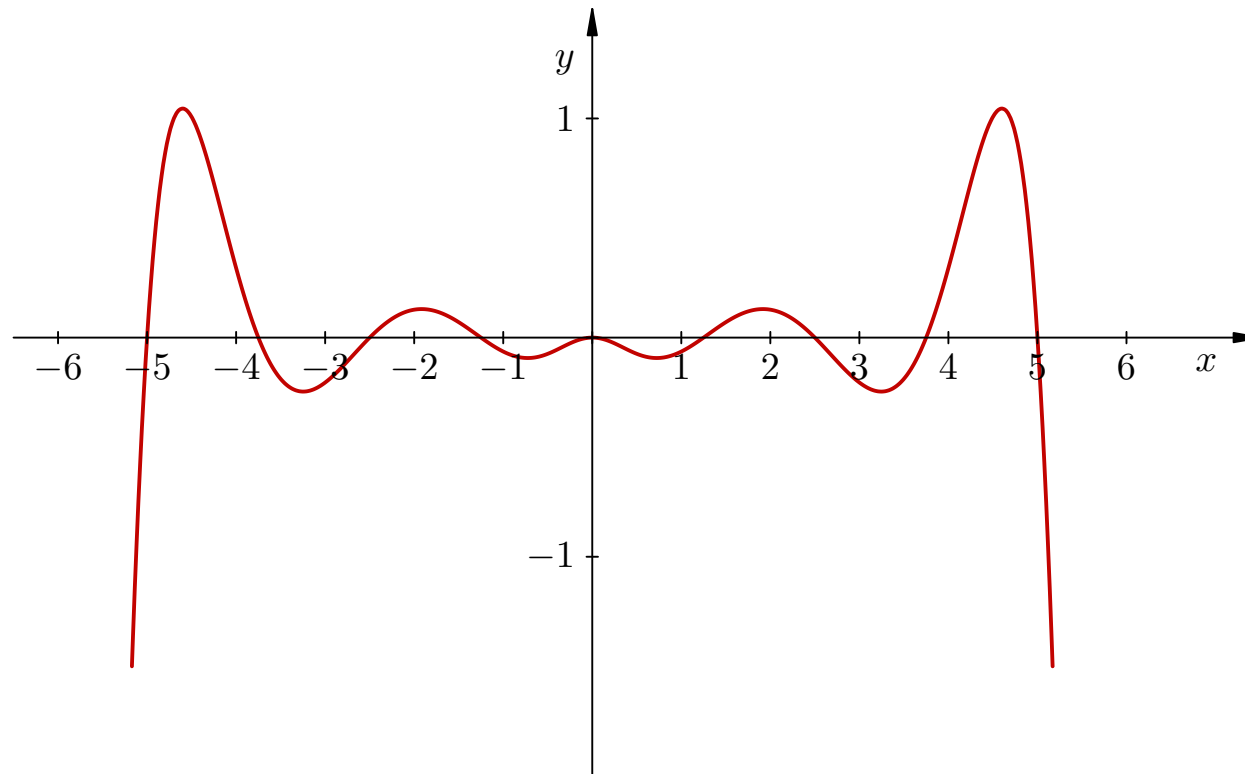
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 5.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



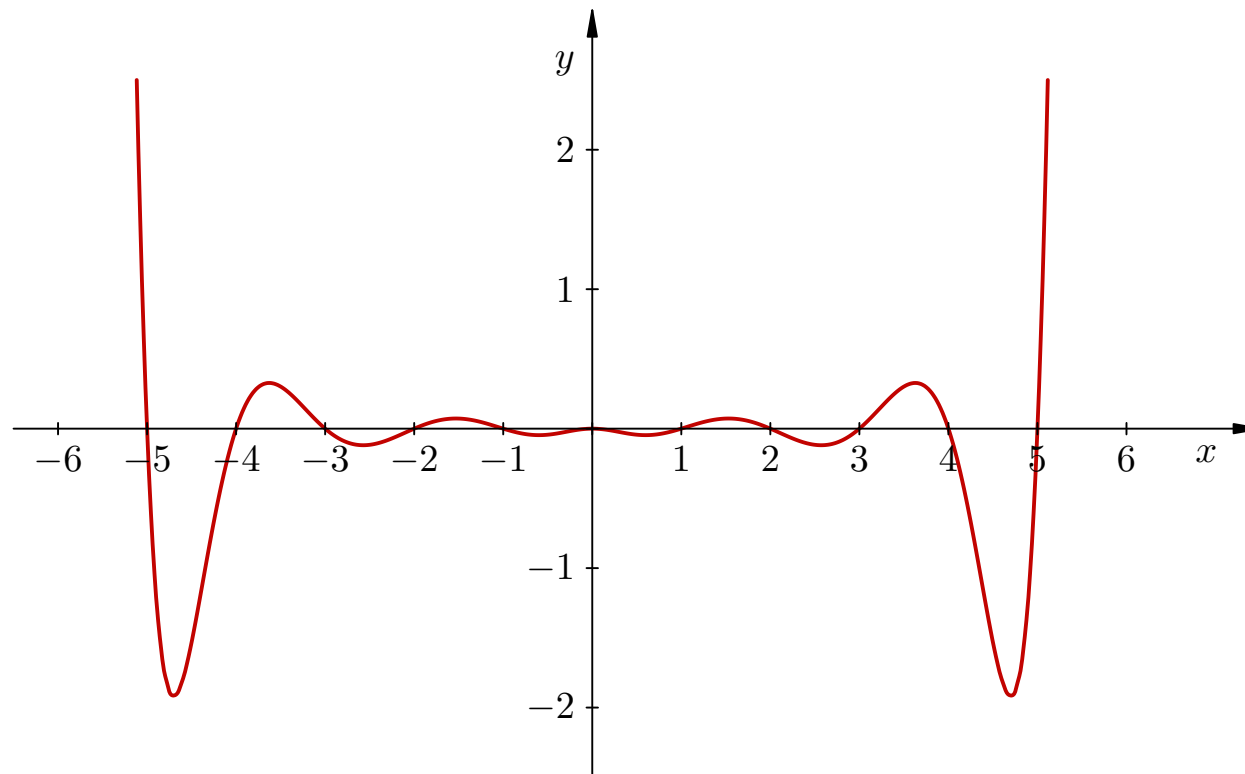
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 6.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



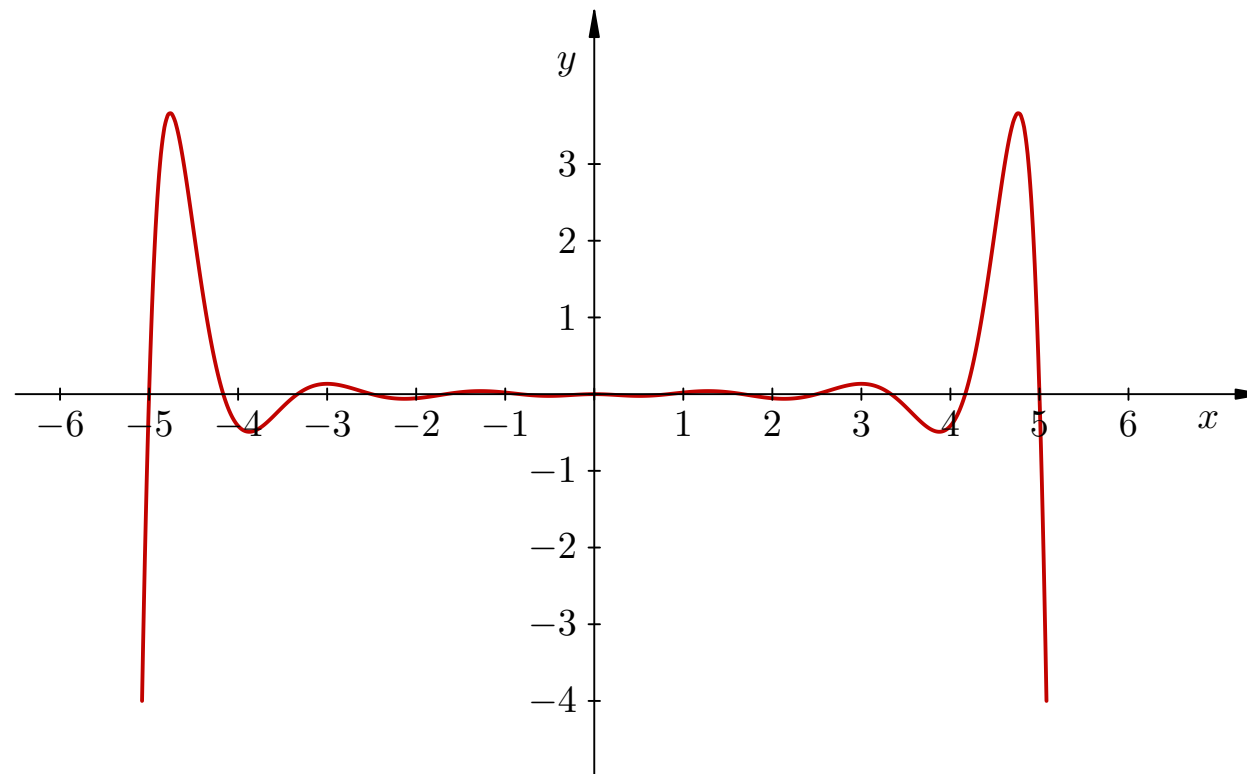
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 8.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



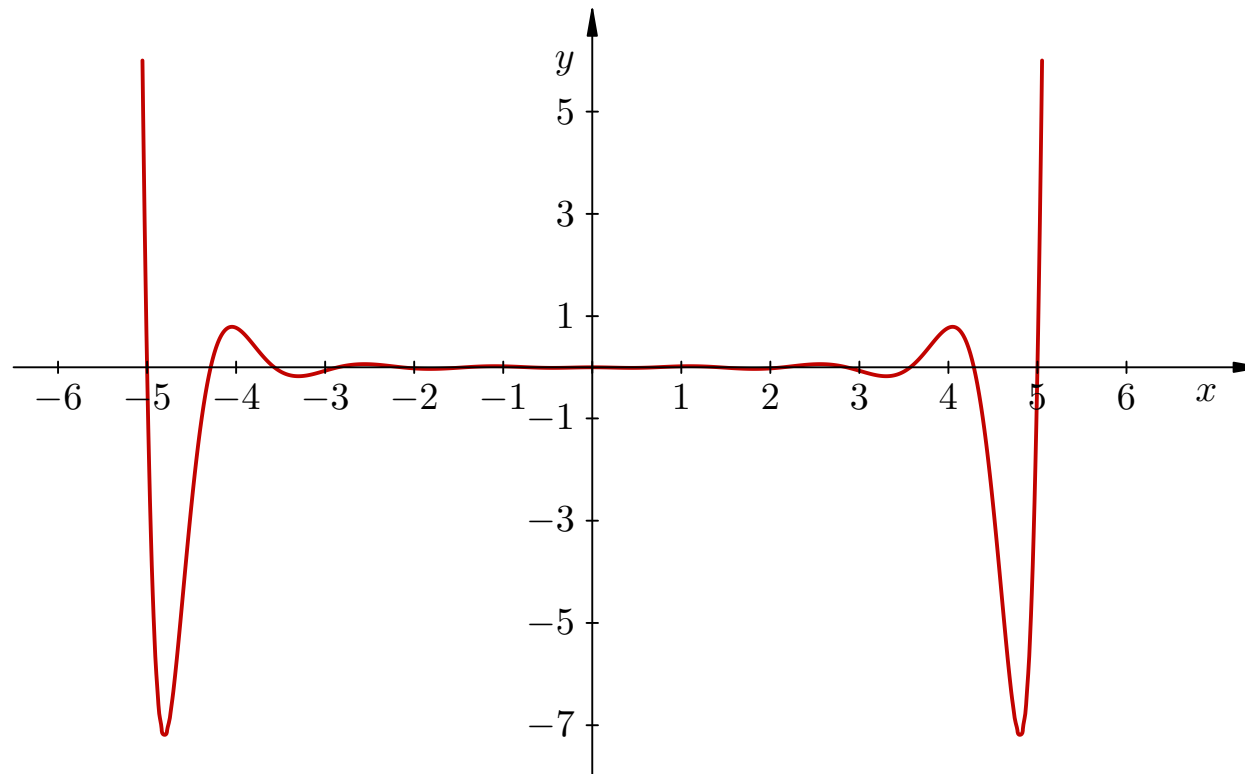
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 10.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



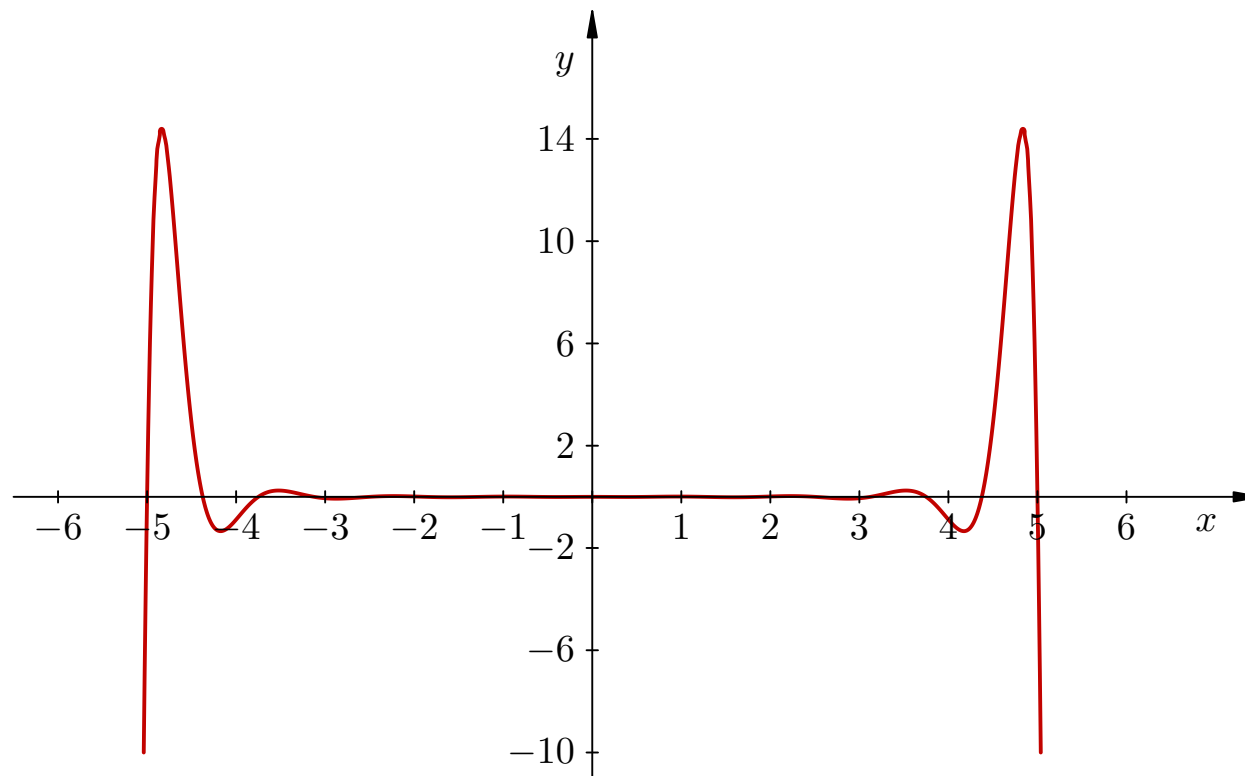
Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 12.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 14.

Primjer Runge — ekvidistantna mreža, greška



Ekvidistantna mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 16.

Analiza

Za primjer **Runge** može se provesti pažljiva analiza (vidi skriptu) i pokazati da

- čim je $|x| > 3.63\dots$, a interpolira se u ekvidistantnim čvorovima, niz interpolacijskih polinoma **divergira**.

Sljedeći primjer pokazuje da postoji još **gora** situacija — niz interpolacijskih polinoma **konvergira** samo u **3** točke.

Primjer. (Bernstein, 1912. g.) Neka je

$$f(x) = |x|$$

i neka je p_n interpolacijski polinom u $n + 1$ ekvidistantnih čvorova na $[-1, 1]$. Tada $|f(x) - p_n(x)| \rightarrow 0$, kad $n \rightarrow \infty$, **samo** u **tri** točke: $x = -1, 0, 1$.

Primjer Runge — nastavak

Može li se funkciji Runge “pomoći”? Može!

Ako umjesto ekvidistantnih čvorova interpolacije uzmemo neekvidistantne, točnije,

• tzv. Čebiševljeve točke,

onda će, porastom stupnja n , niz interpolacijskih polinoma p_n

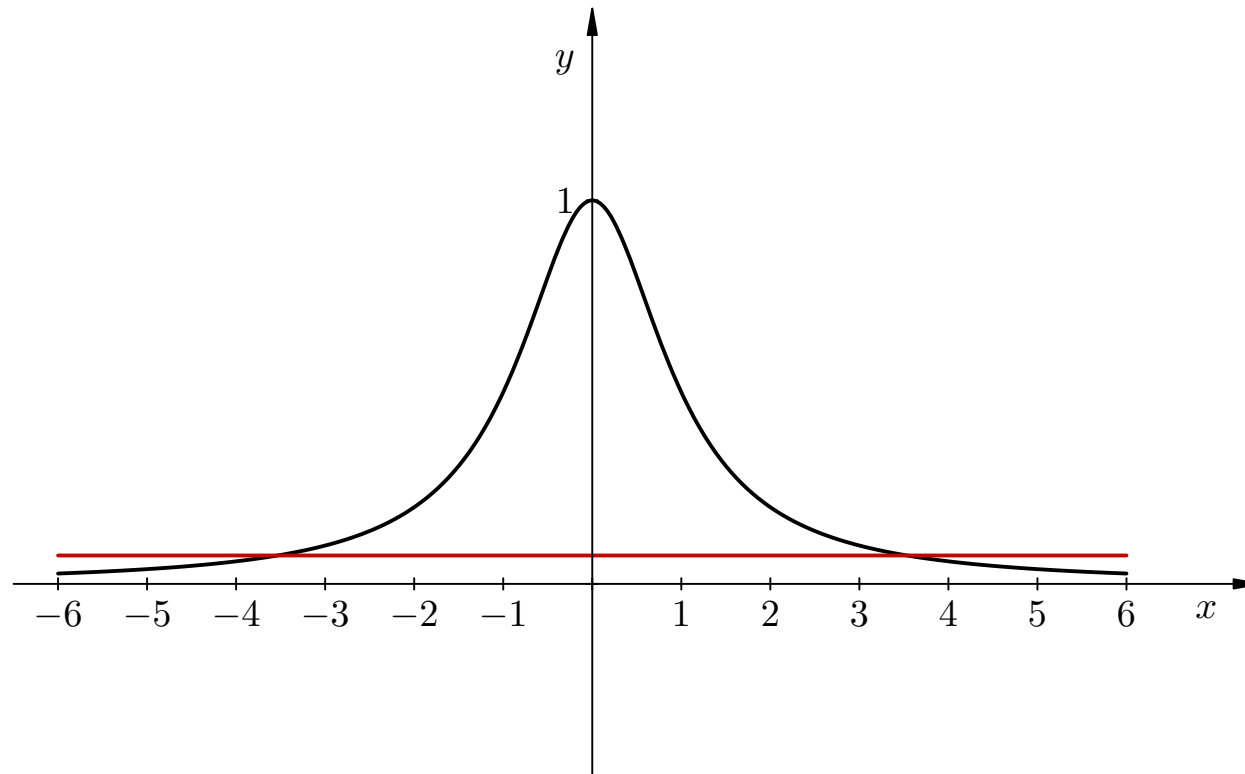
• konvergirati (i to uniformno) prema funkciji f .

Na intervalu $[a, b]$, uzlazno poredane Čebiševljeve točke su

$$x_k = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cdot \cos \frac{(2(n-k)+1)\pi}{2n+2}, \quad k = 0, \dots, n.$$

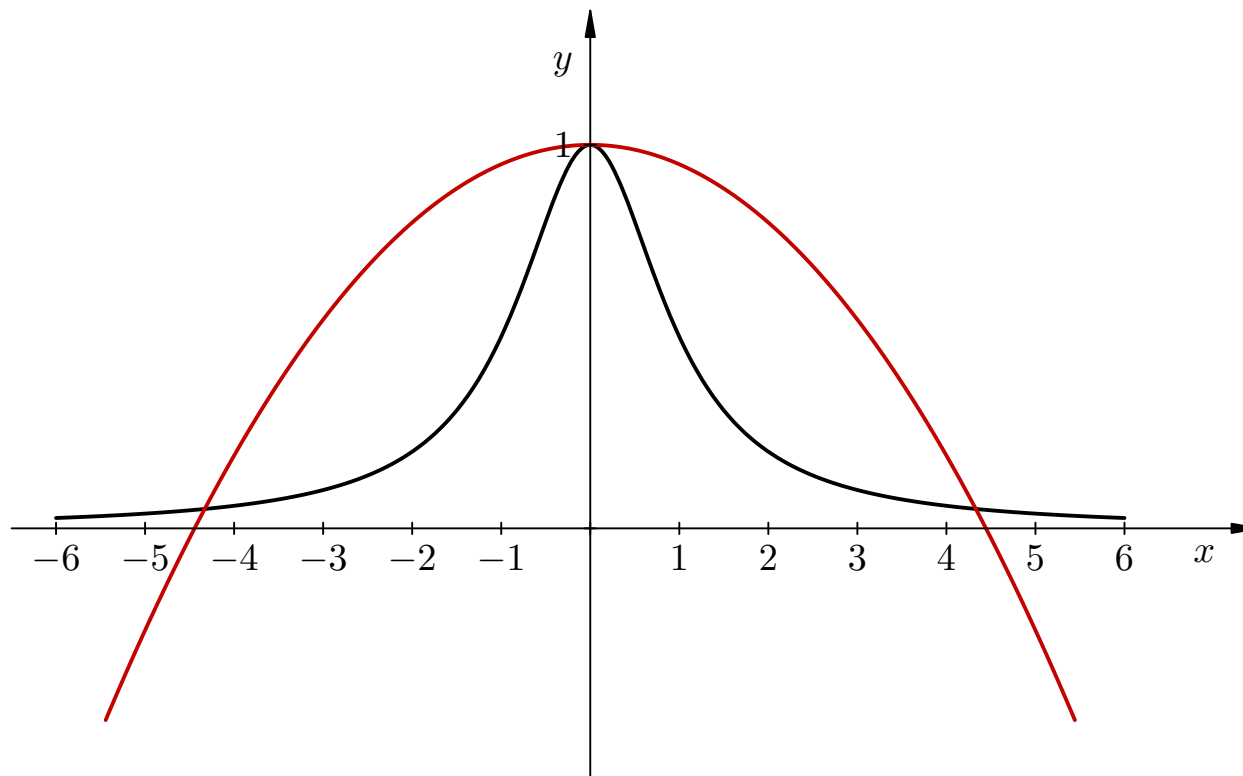
O njima više — malo kasnije. Prvo primjer za funkciju Runge.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



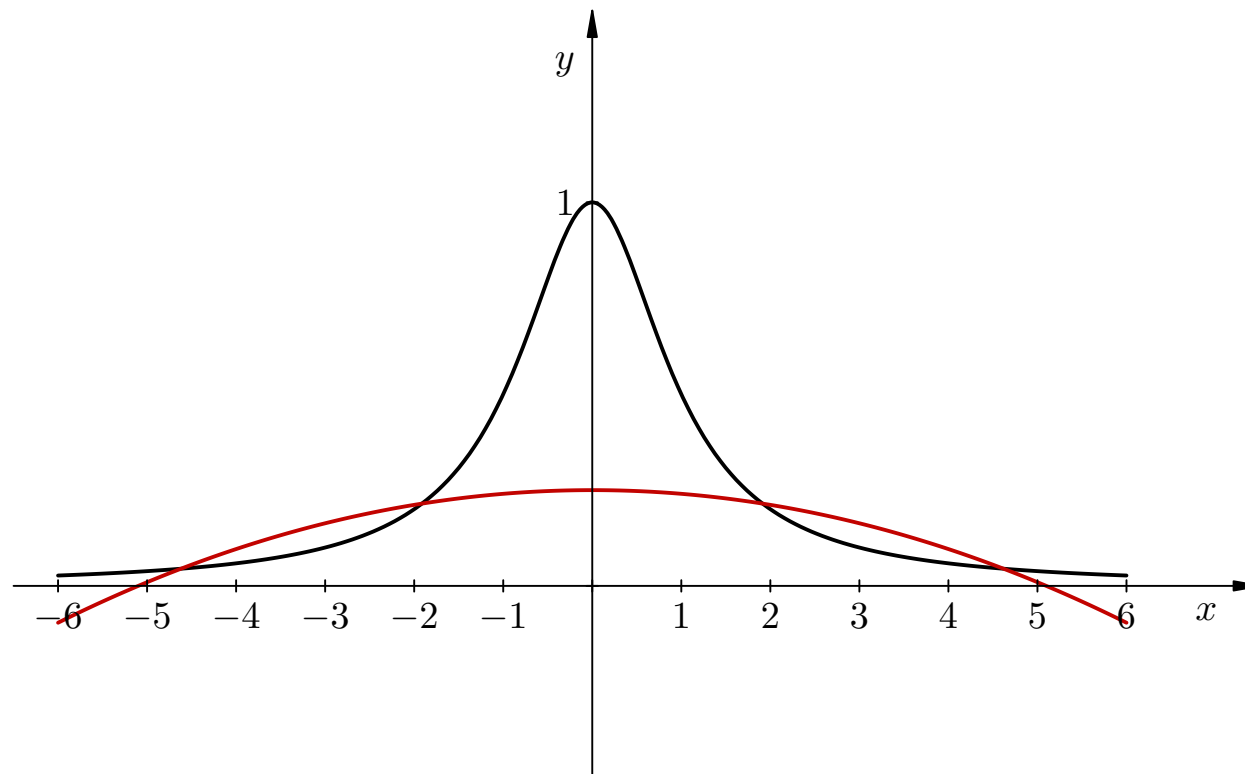
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 1.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



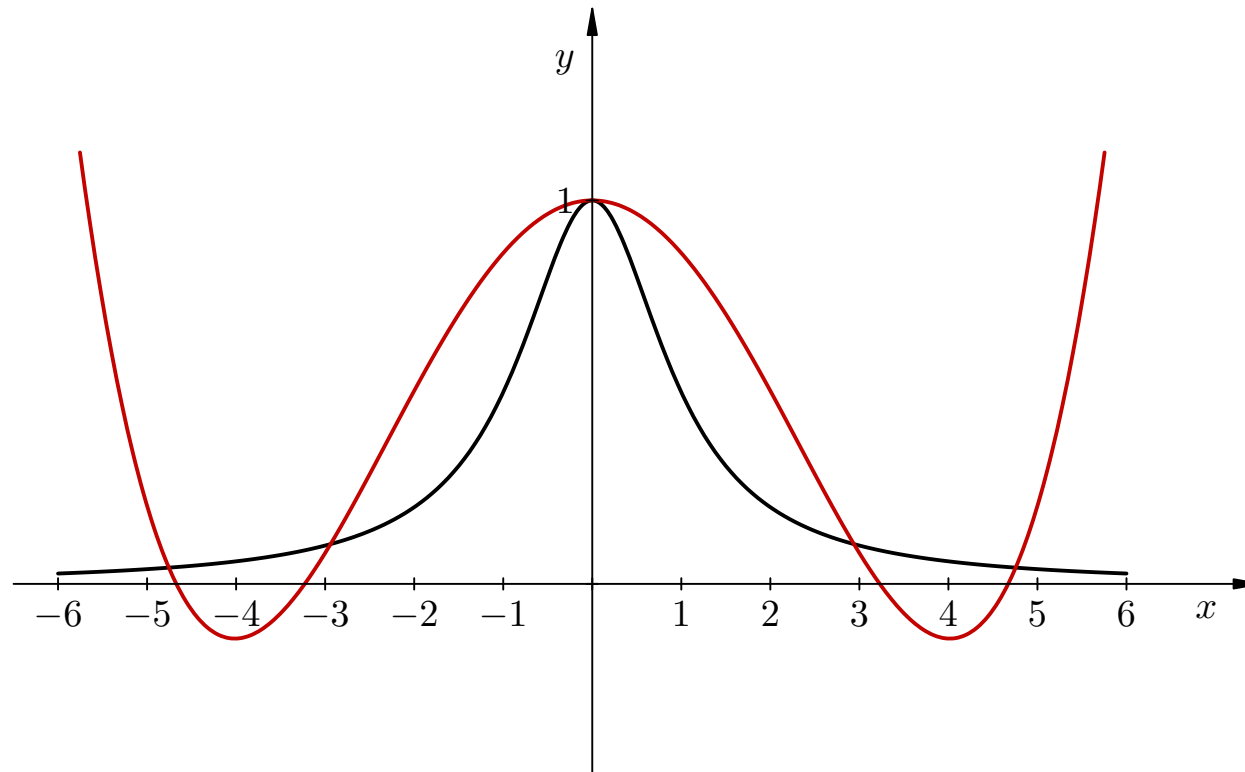
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 2.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



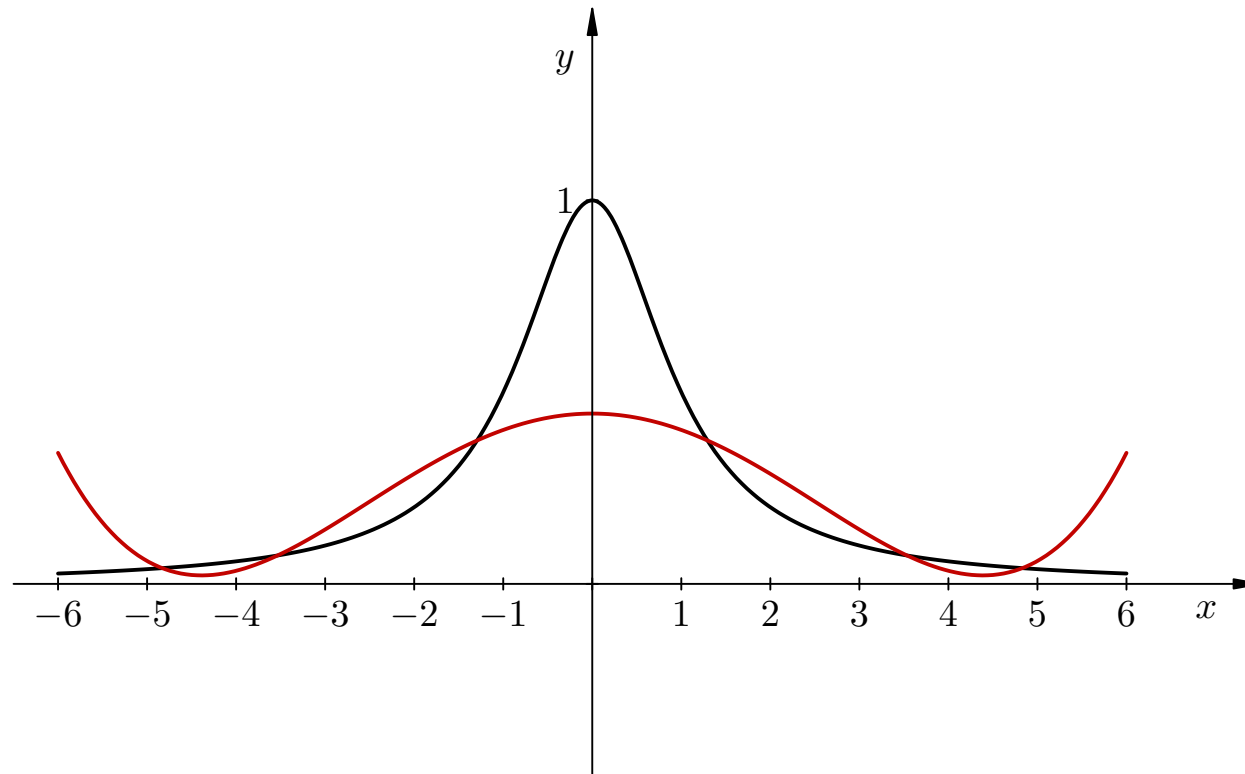
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 3.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



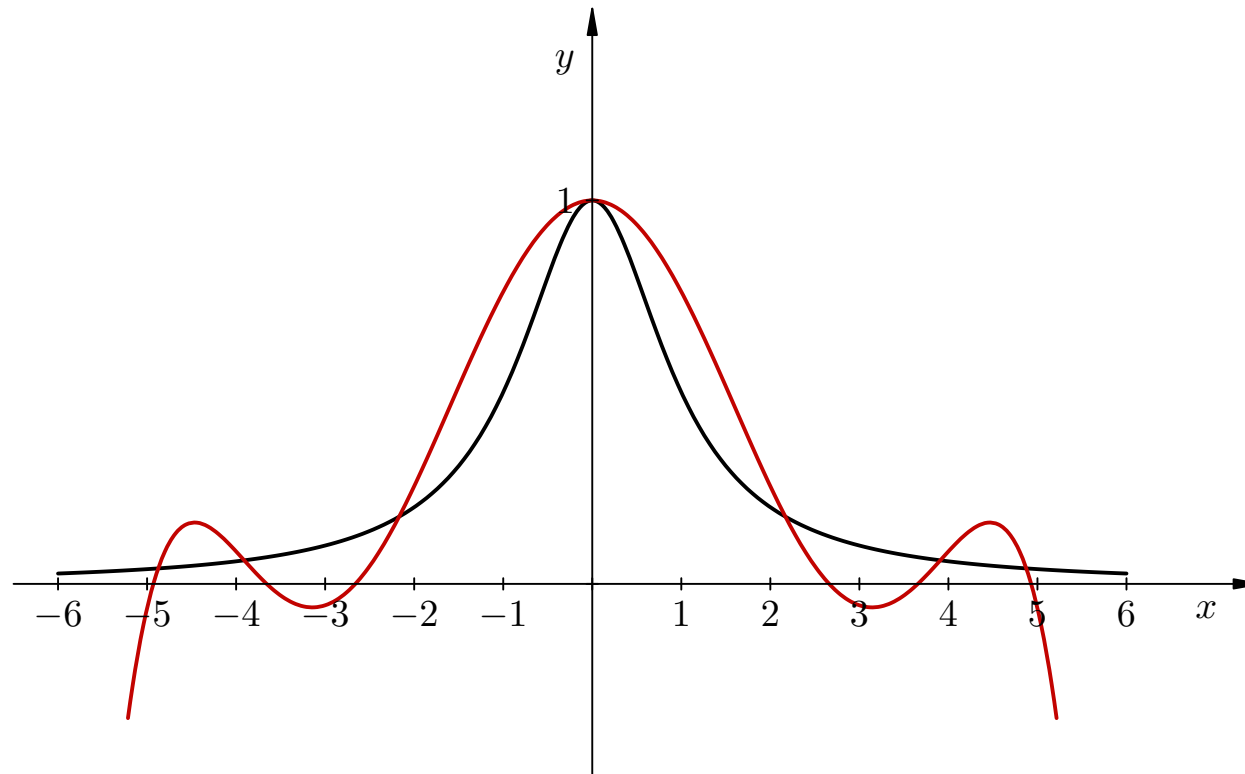
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 4.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



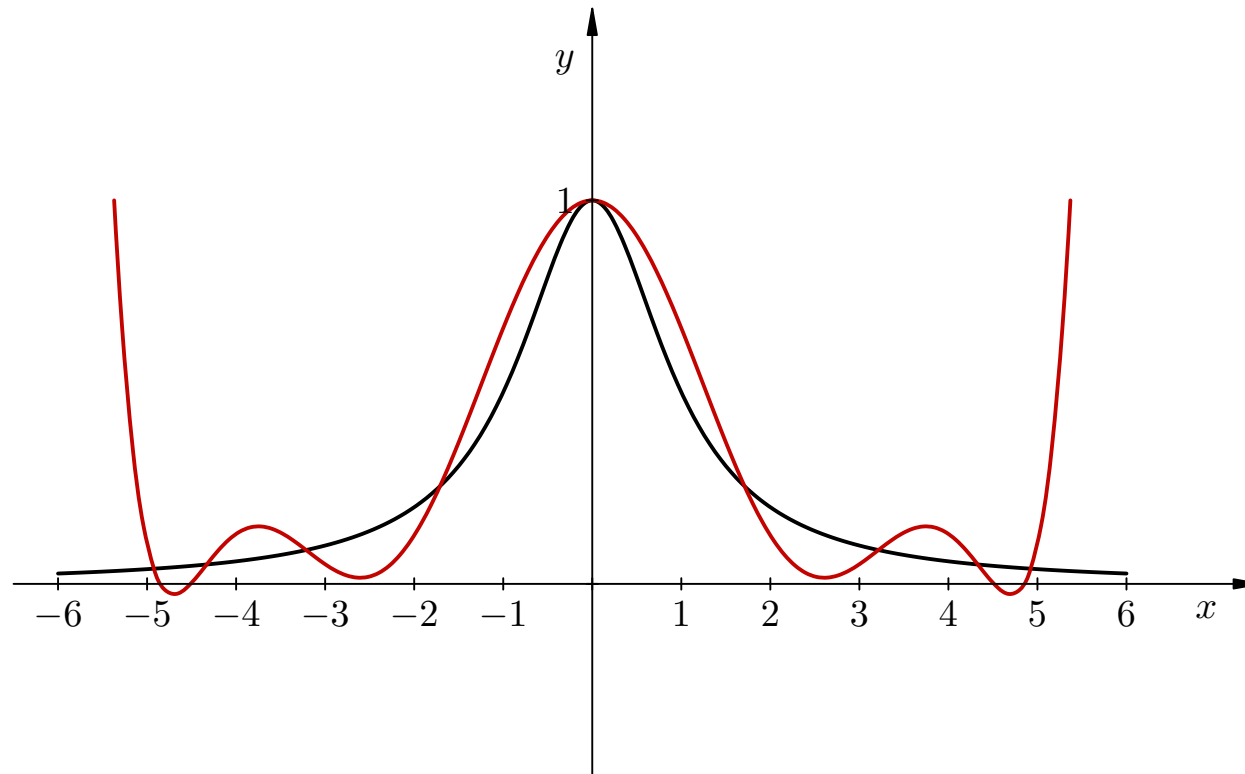
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 5.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



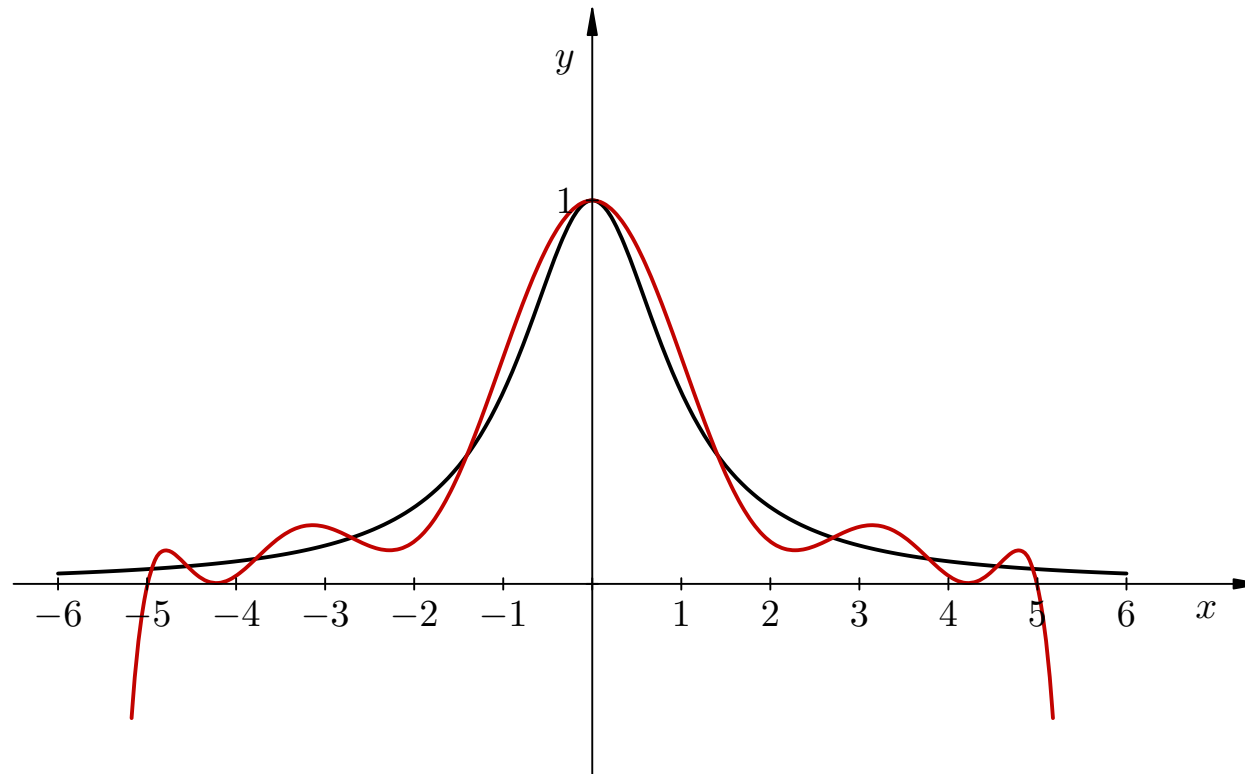
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 6.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



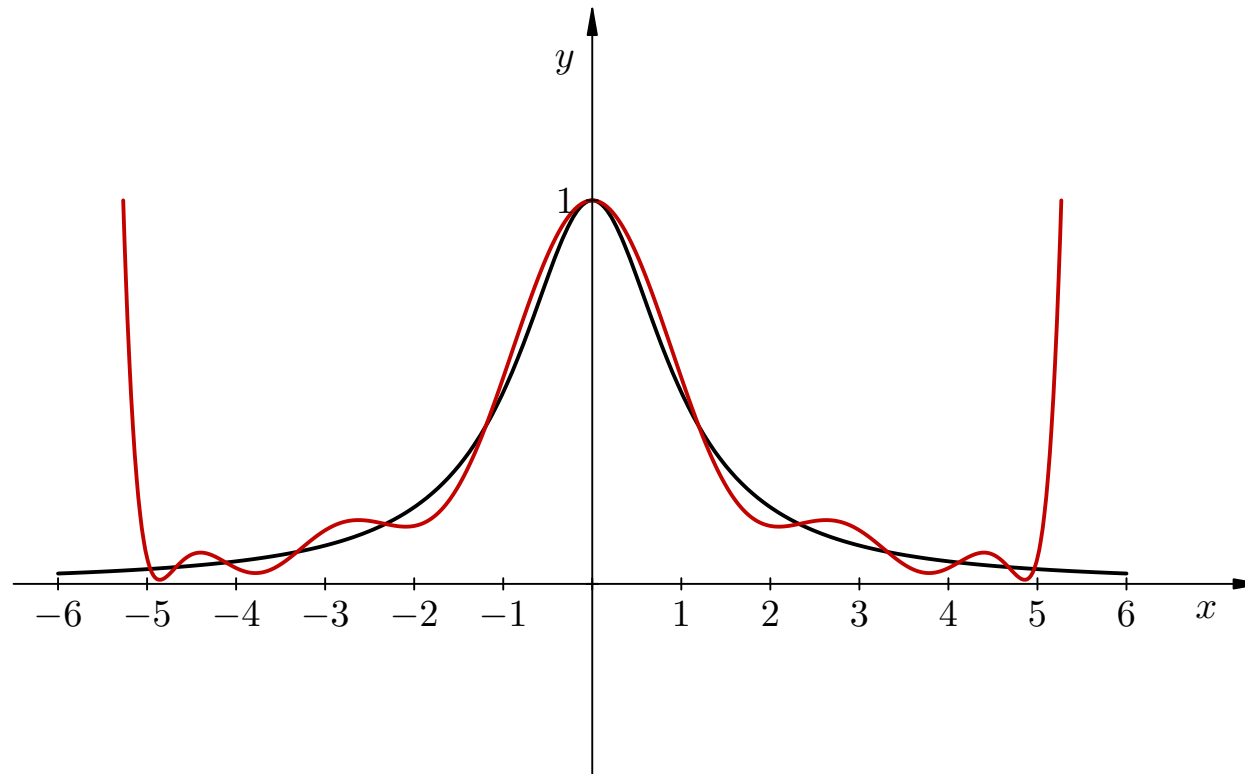
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 8.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



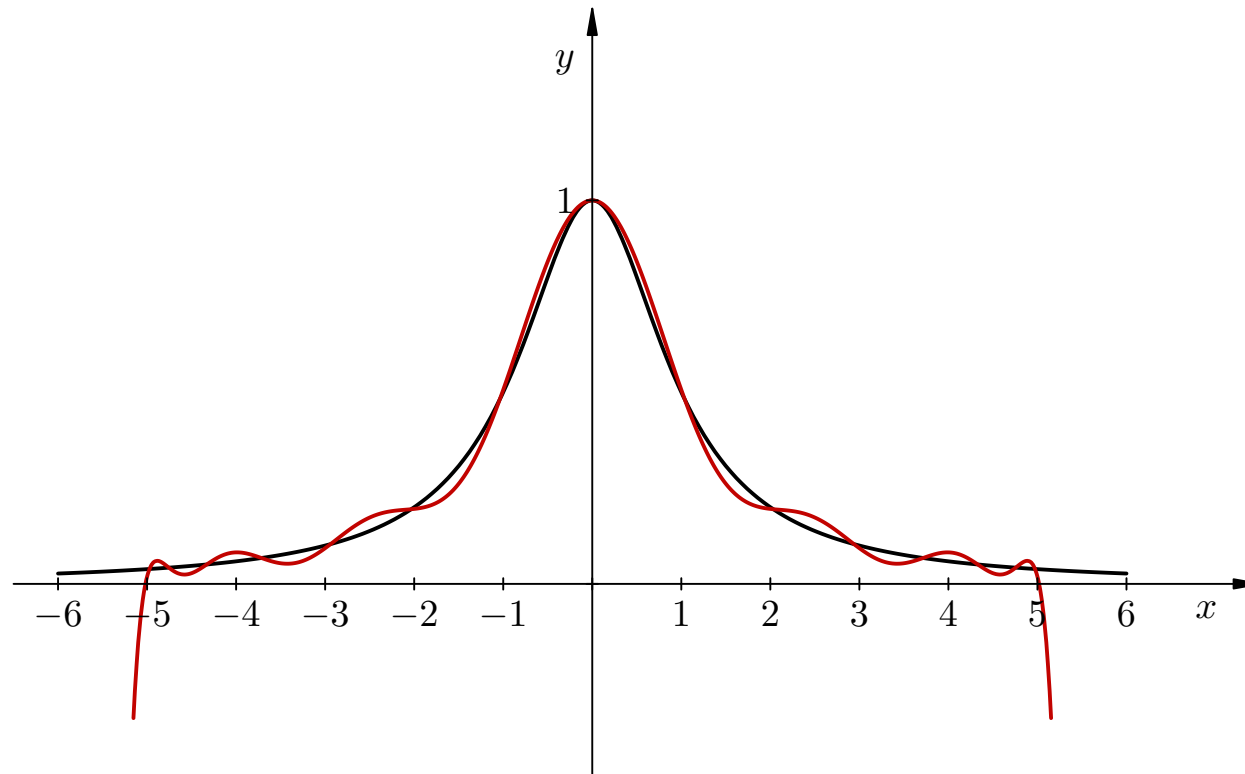
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 10.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



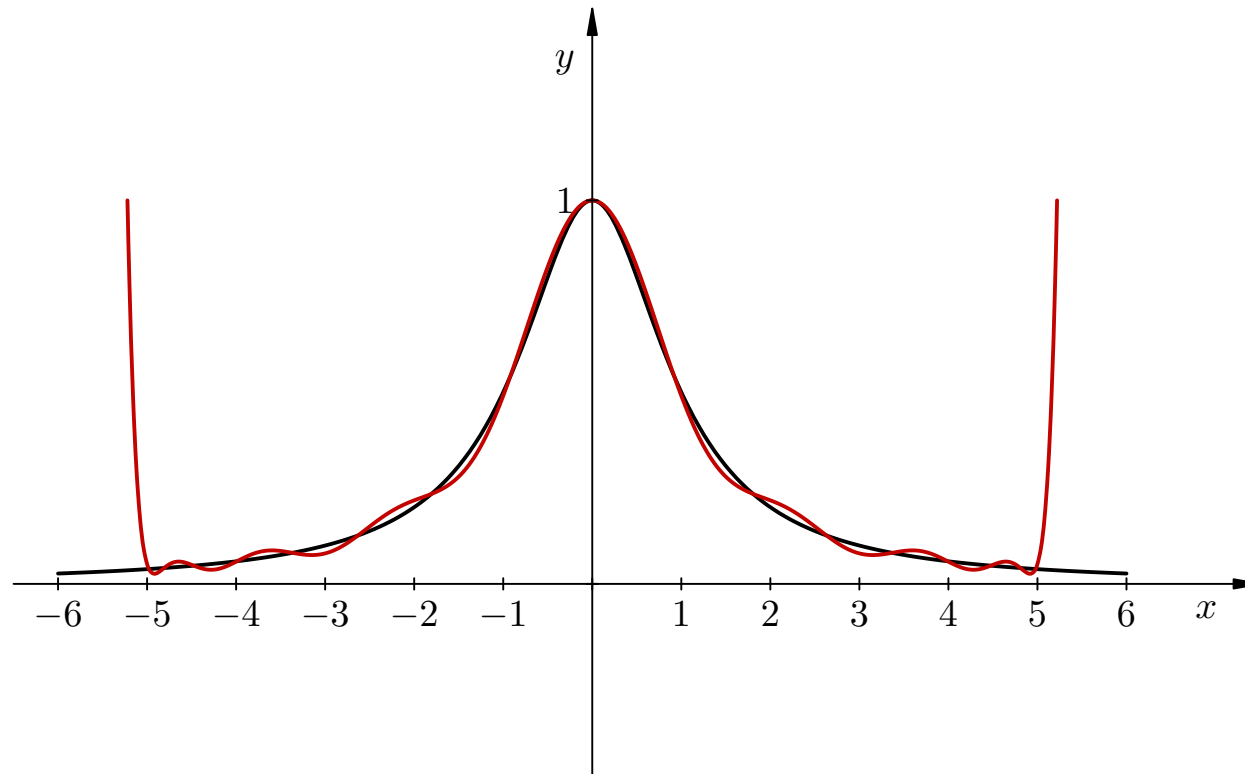
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 12.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



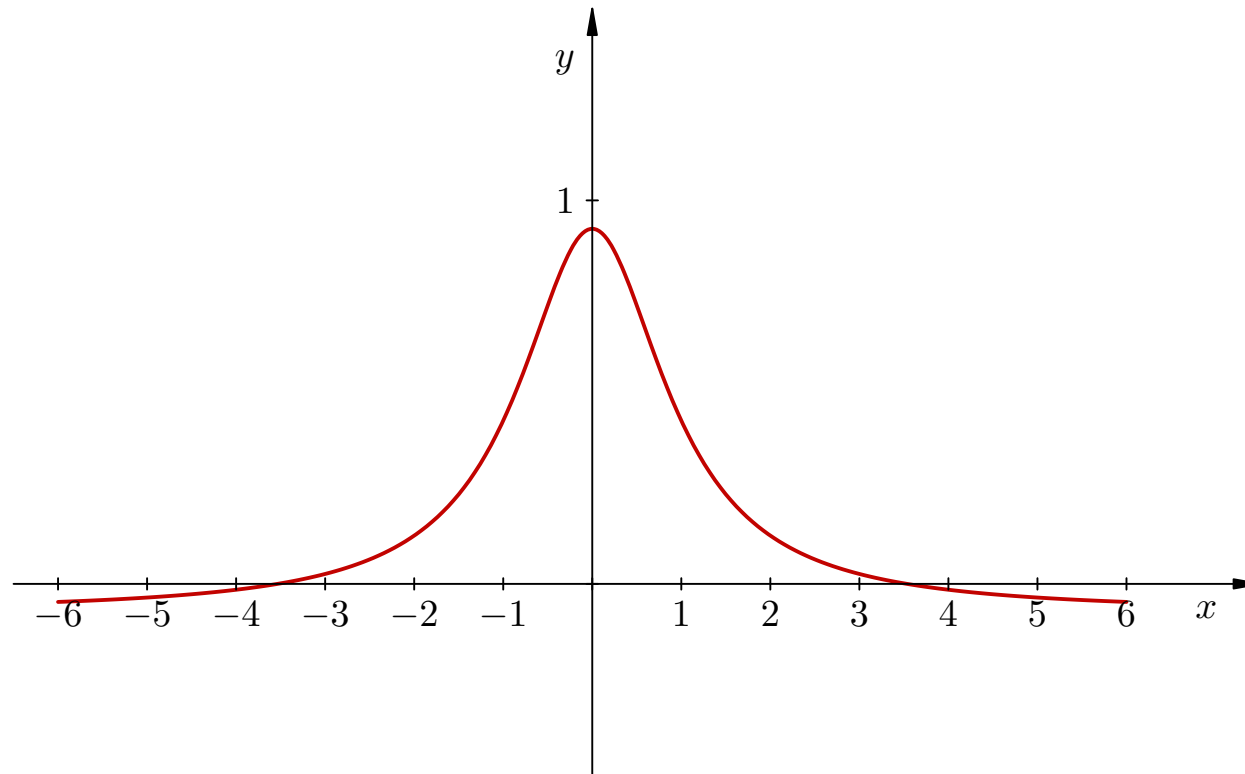
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 14.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža



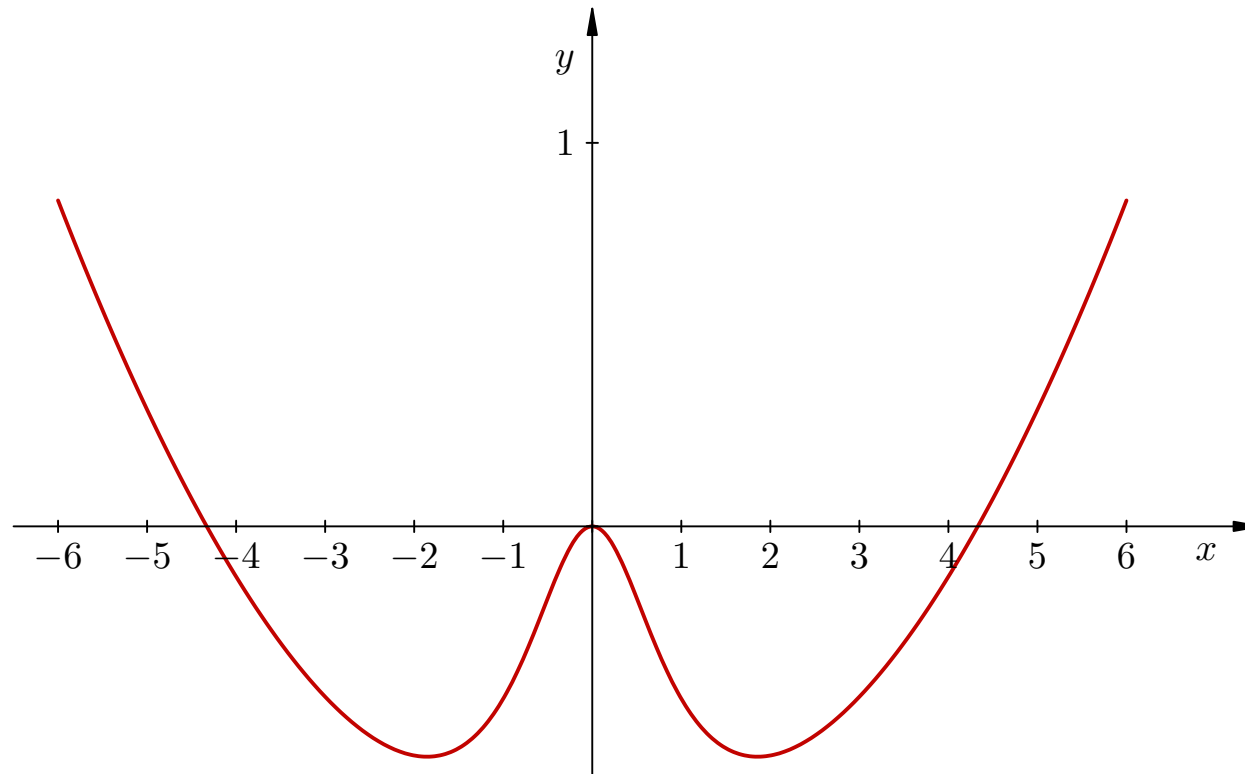
Čebiševljeva mreža,
interpolacijski polinom stupnja 16.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



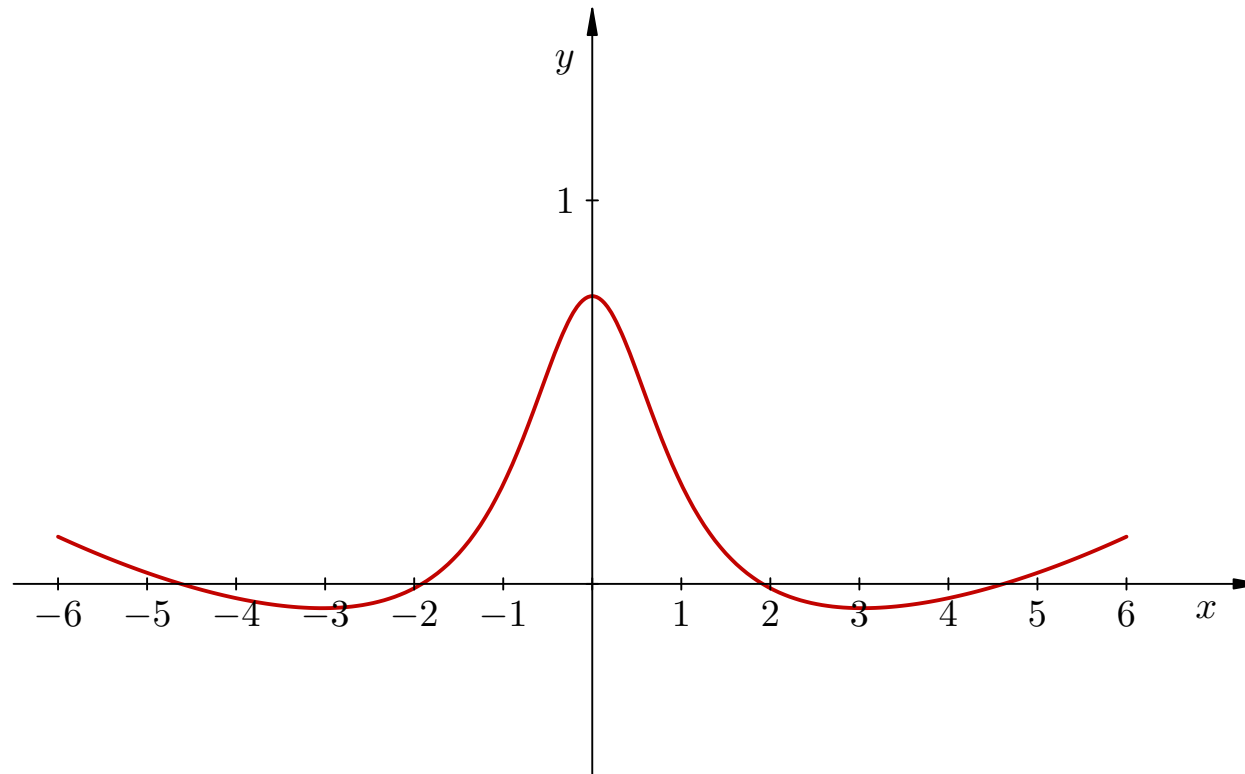
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 1.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



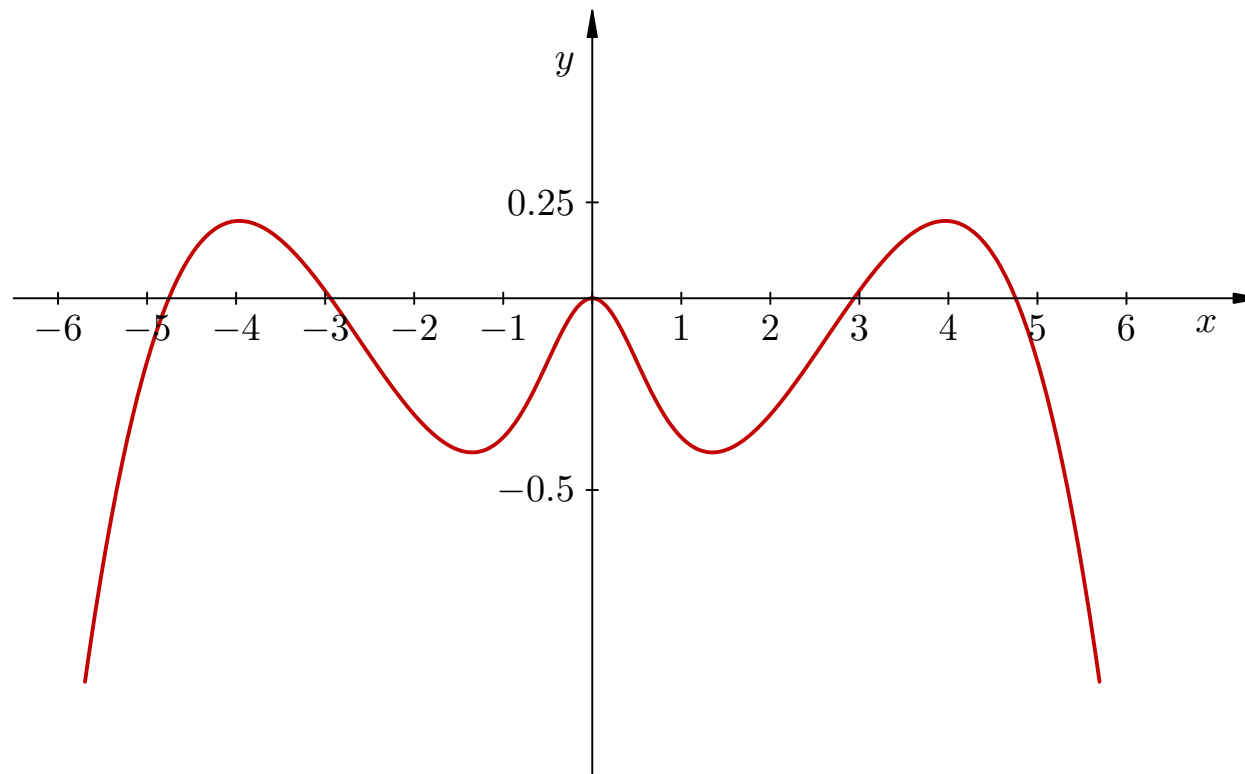
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 2.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



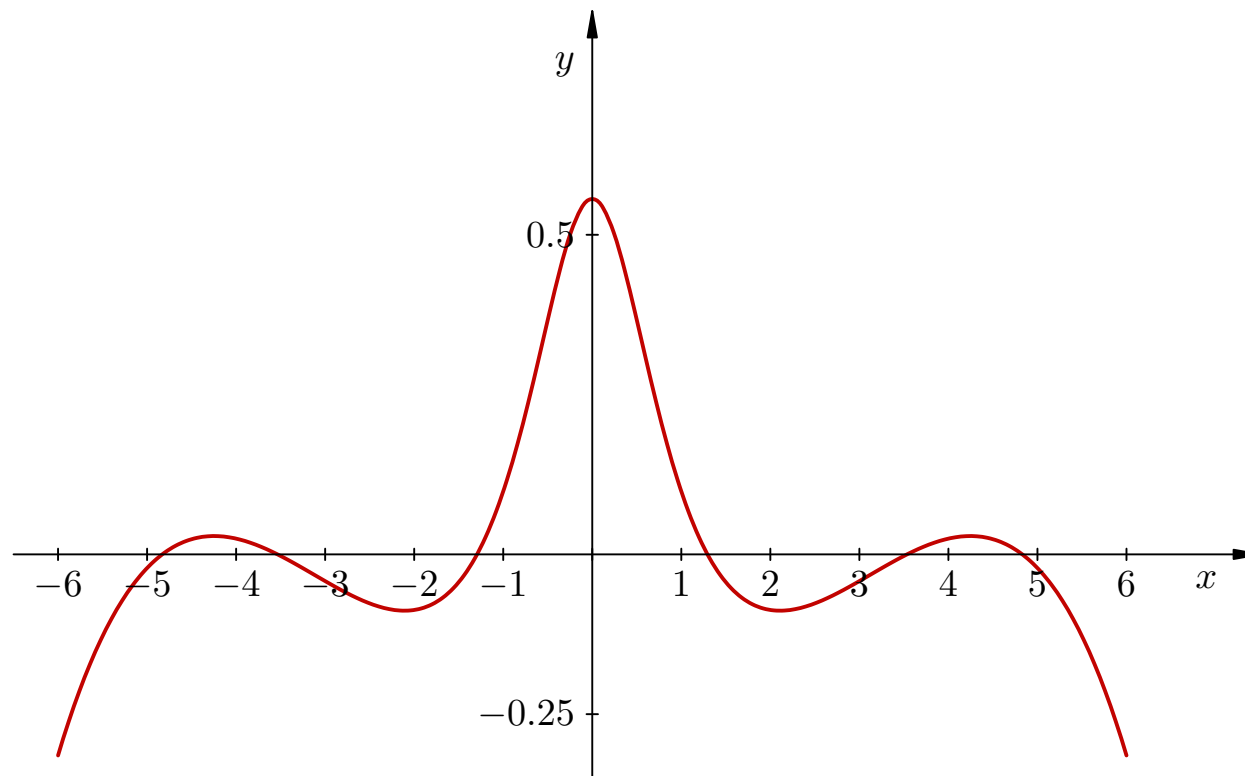
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 3.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



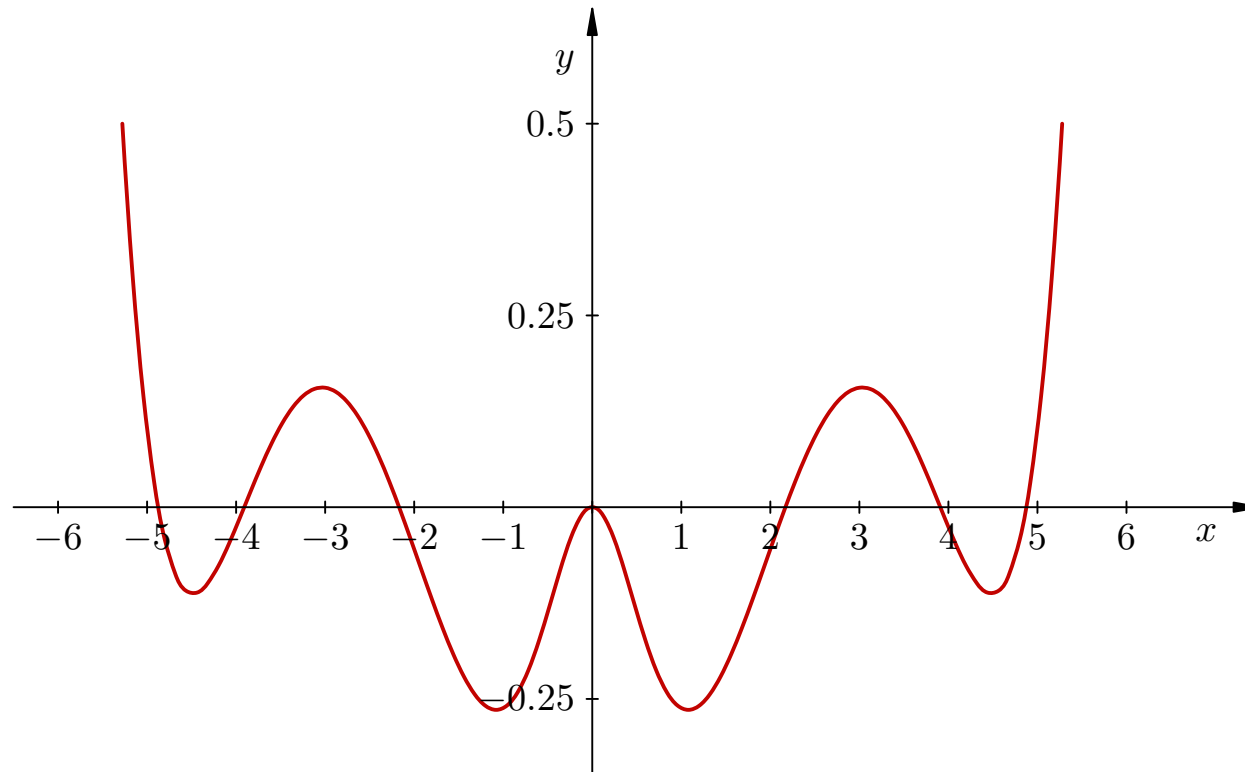
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 4.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



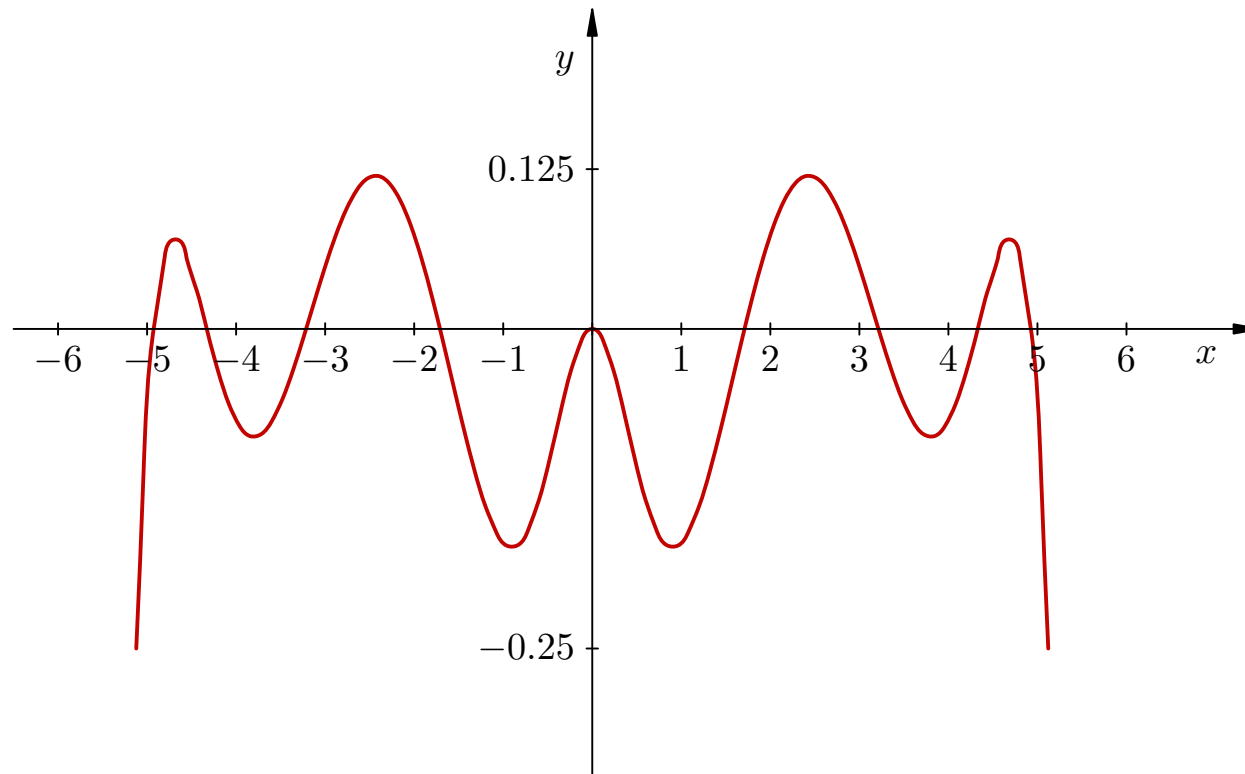
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 5.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



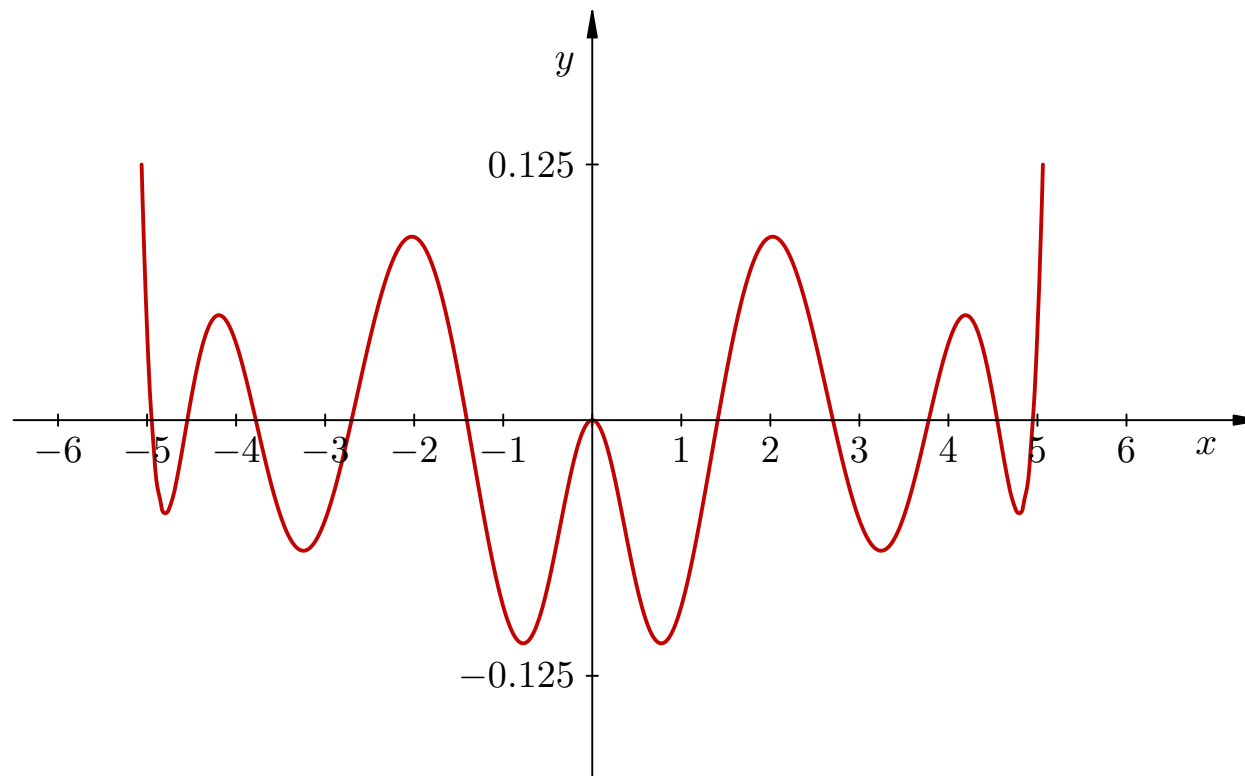
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 6.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



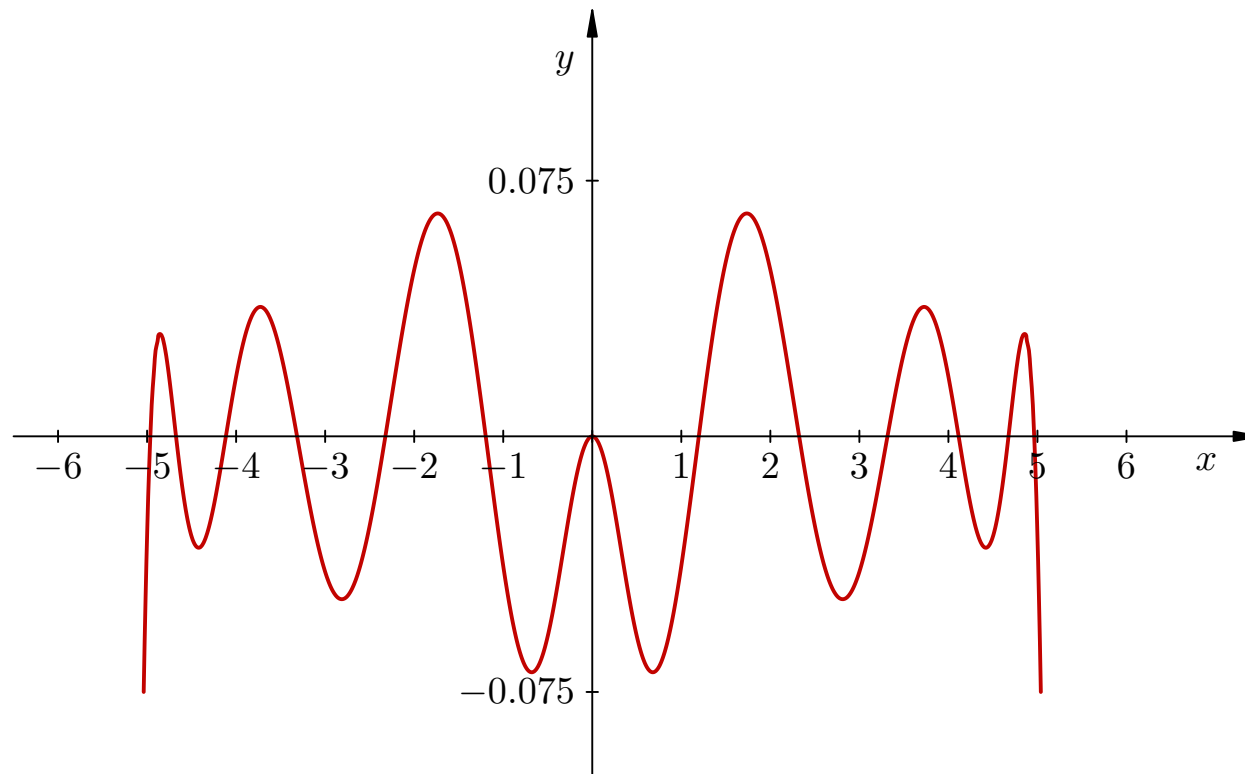
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 8.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



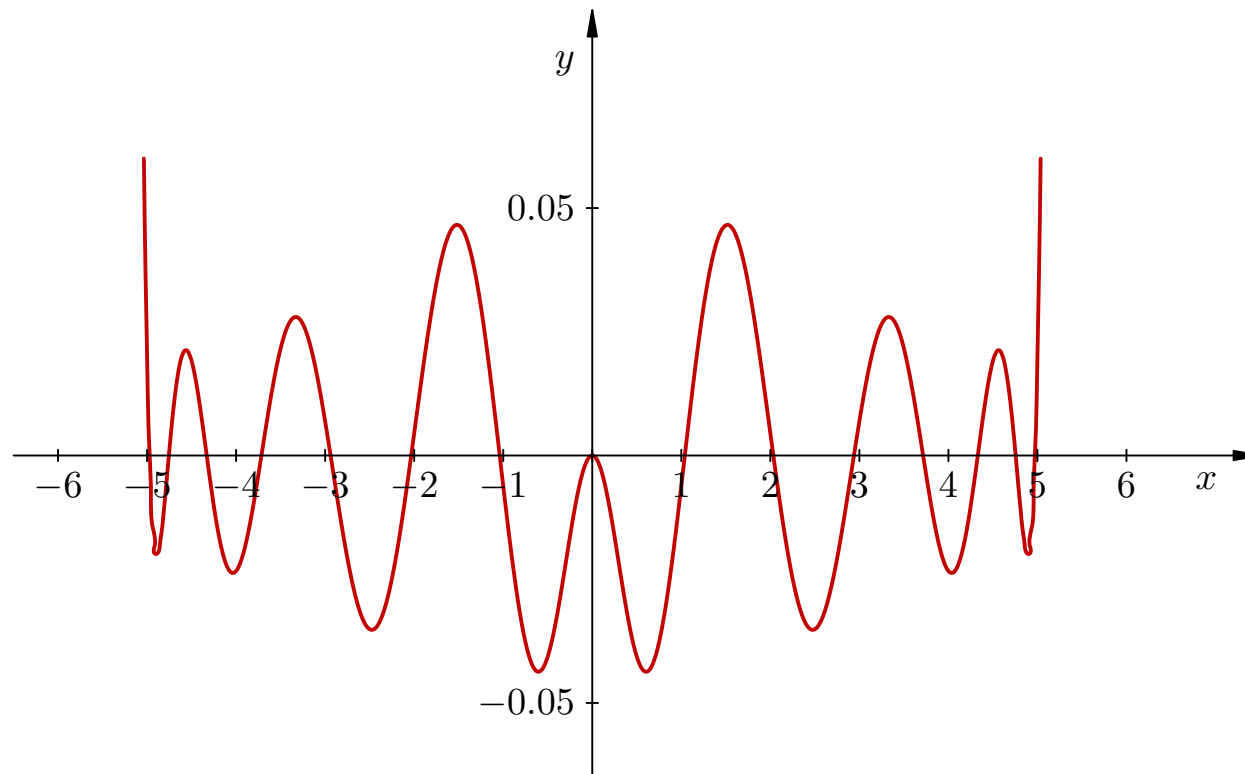
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 10.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



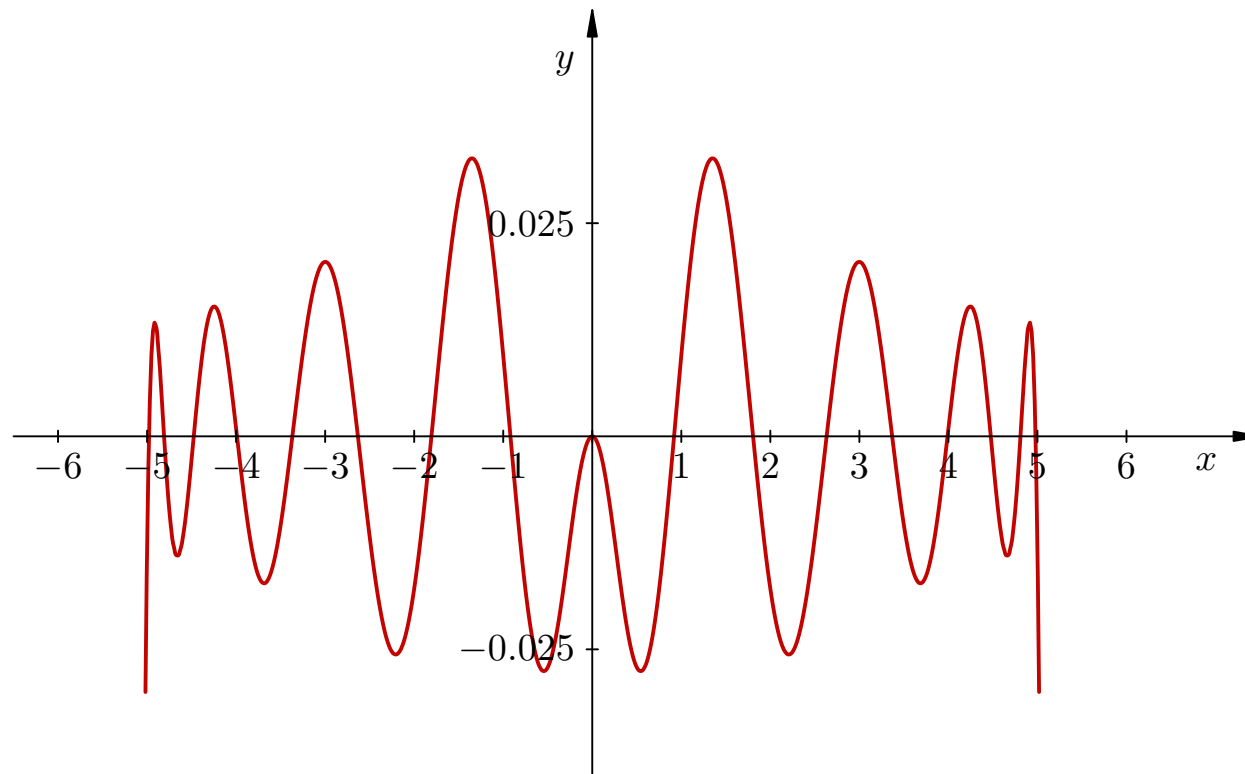
Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 12.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 14.

Primjer Runge — Čebiševljeva mreža, greška



Čebiševljeva mreža,
greška interpolacijskog polinoma stupnja 16.

Jesmo li spašeni?

Sljedeći teorem ukazuje na to da je

- **nemoguće** naći takav izbor **točaka** interpolacije polinomima, koji bi bio **dobar** za **svaku** funkciju.

Teorem. (Faber, 1914. g.) Za **svaki** mogući izbor **točaka** interpolacije, tj. za **svaki niz** skupova čvorova

$$X^{(n)} = \{x_0^{(n)}, \dots, x_n^{(n)}\}, \quad n \in \mathbb{N}_0,$$

postoji neprekidna funkcija f , za čiji **niz** interpolacijskih polinoma p_n , stupnja n , s čvorovima iz skupa $X^{(n)}$, vrijedi

$$\|f(x) - p_n(x)\|_\infty \not\rightarrow 0. \quad \blacksquare$$

Dakle, **nema** (uniformne) konvergencije, tj. “**nema spasa**”!

Interpolacija u Čebiševljevim točkama

Greška interpolacije — što se može učiniti?

Neka je p_n interpolacijski polinom za funkciju f s međusobno različitim čvorovima interpolacije $x_k \in [a, b]$, za $k = 0, \dots, n$.

U bilo kojoj točki $x \in [a, b]$ za grešku interpolacijskog polinoma p_n vrijedi

$$e(x) := f(x) - p_n(x) = \frac{\omega(x)}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi).$$

za neku točku $\xi \in (x_{\min}, x_{\max}) \subseteq (a, b)$, uz

$$x_{\min} := \min\{x_0, \dots, x_n, x\}, \quad x_{\max} := \max\{x_0, \dots, x_n, x\}.$$

Ako je funkcija f unaprijed zadana, onda faktor s derivacijom funkcije f ne možemo “kontrolirati”.

Što možemo napraviti?

Idealno bi bilo **minimizirati** po apsolutnoj vrijednosti **maksimalnu** grešku aproksimacije, tj. $\|f - p_n\|_\infty \rightarrow \min$, na željenom intervalu $[a, b]$.

- Polinom p_n^* za koji je **maksimalna** greška **minimalna** se može konstruirati.
- Kad promatramo grešku polinoma p_n^* , može se pokazati da susjedni **maksimumi** grešaka imaju **suprotne** znakove, ali su po **apsolutnoj** vrijednosti **jednaki**.
- Jedina je **nevolja** da je postupak traženja takve aproksimacije **iterativan** (Remesov algoritam), tj. takvu aproksimaciju nije jednostavno naći.
- Takva aproksimacija zove se **minimaks** aproksimacija funkcije f na intervalu $[a, b]$.

Polinom čvorova — razne mreže čvorova

Umjesto egzaktne **minimaks** aproksimacije p_n^* funkcije f na intervalu $[a, b]$, zadovoljimo se “**skromnijim**” ciljem:

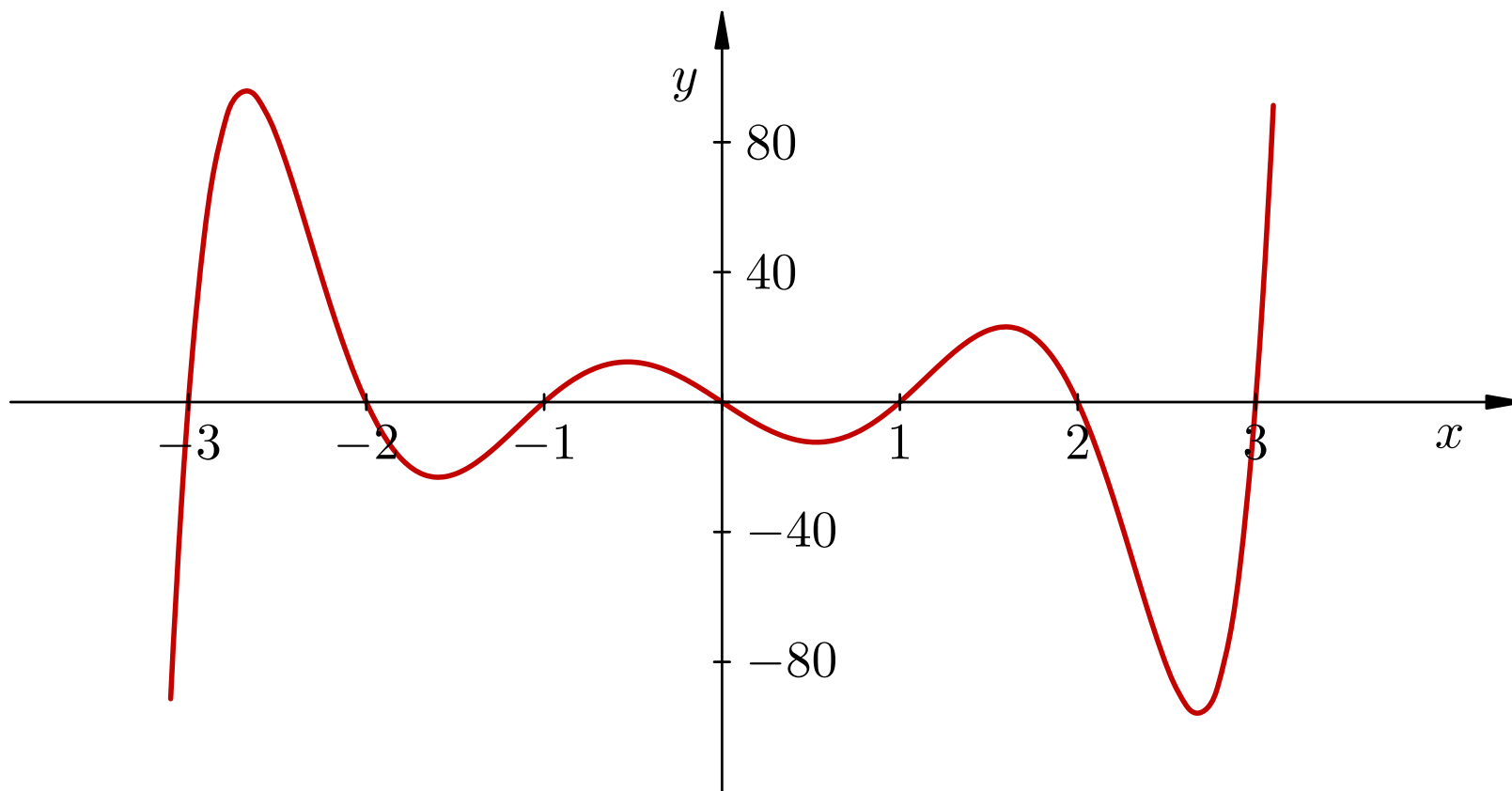
- ako **možemo birati čvorove** interpolacije x_0, \dots, x_n ,
- minimizirajmo maksimalnu** pogrešku polinoma **čvorova**

$$\omega(x) = \prod_{k=0}^n (x - x_k).$$

Pogledajmo kako izgleda polinom čvorova. Ako su čvorovi

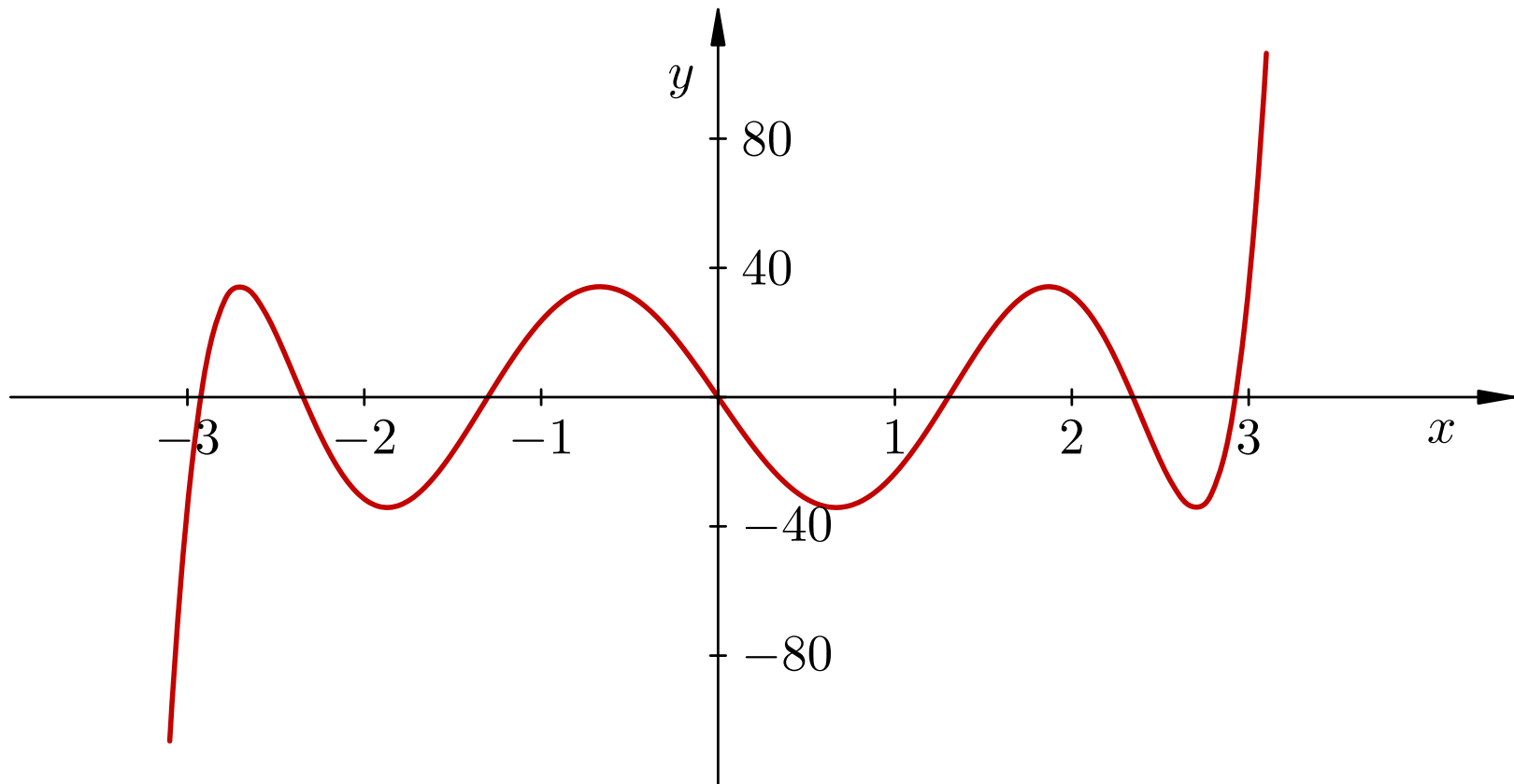
- ekvidistantni** — **najmanja** greška je pri **sredini** intervala, a **raste** prema **rubu**,
- Čebiševljevi** — **maksimalna** greška je **jednaka** na **svakom** podintervalu između čvorova, uključivo i rubove a, b .

Polinom čvorova za $n = 6$, ekvidistantna mreža



$\omega(x)$ na $[-3, 3]$, za $n = 6$, ekvidistantna mreža

Polinom čvorova za $n = 6$, Čebiševljeva mreža



$\omega(x)$ na $[-3, 3]$, za $n = 6$, Čebiševljeva mreža

Čebiševljeve točke

Prethodne slike navode na činjenicu da,

- kad se uzmu Čebiševljevi čvorovi,
- greška mijenja znak, a
- susjedni maksimumi grešaka su po apsolutnoj vrijednosti približno jednaki (v. primjer Runge).

Takvu aproksimaciju zovemo skoro minimaks aproksimacija.

Sve dokaze provodit ćemo na “standardnom” intervalu $[-1, 1]$. Ako je funkcija f zadana na nekom drugom intervalu, onda ju linearnom (afinom) transformacijom

$$y = cx + d$$

svodimo na interval $[-1, 1]$.

Čebiševljeve točke

Pokažimo da Čebiševljevi čvorovi minimiziraju maksimalnu vrijednost polinoma čvorova, tj. da minimiziraju

$$\max_{a \leq x \leq b} |(x - x_0) \cdots (x - x_n)|.$$

Na intervalu $[a, b]$, uzlazno poredane Čebiševljeve točke su

$$x_k = \frac{a + b}{2} + \frac{b - a}{2} \cdot \cos \frac{(2(n - k) + 1)\pi}{2n + 2}, \quad k = 0, \dots, n.$$

Ako je $a = -1$, $b = 1$, onda su Čebiševljeve točke x_k , za $k = 0, \dots, n$,

• sve nultočke Čebiševljevog polinoma prve vrste T_{n+1} .

Čebiševljevi polinomi — definicija i rekurzija

Čebiševljevi polinomi **prve** vrste, oznaka je T_n , za $n \geq 0$, definirani su relacijom

$$T_n(x) = \cos(n \arccos x), \quad x \in [-1, 1].$$

Polinomi T_n zadovoljavaju **tročlanu** rekurzivnu relaciju

$$T_{n+1}(x) - 2xT_n(x) + T_{n-1}(x) = 0, \quad n \in \mathbb{N},$$

(dokaz = zbroj **cosinusa** preko produkta, za $x = \cos \varphi$), uz start

$$T_0(x) = 1, \quad T_1(x) = x.$$

Iz ove rekurzivne relacije odmah slijedi da je T_n **polinom** stupnja n . Usput, za $|x| \geq 1$ vrijedi $T_n(x) = \operatorname{ch}(n \operatorname{Arch} x)$.

Čebiševljevi polinomi — nultočke i ekstremi

Nultočke i ekstreme polinoma T_{n+1} nije teško izračunati.

Njegove nultočke su (silazno indeksirane — kraća formula)

$$x_k = \cos \frac{(2k+1)\pi}{2(n+1)}, \quad k = 0, \dots, n,$$

dok su ekstremi na segmentu $[-1, 1]$ (opet, silazno indeksirani)

$$x'_k = \cos \frac{k\pi}{n+1}, \quad k = 0, \dots, n+1.$$

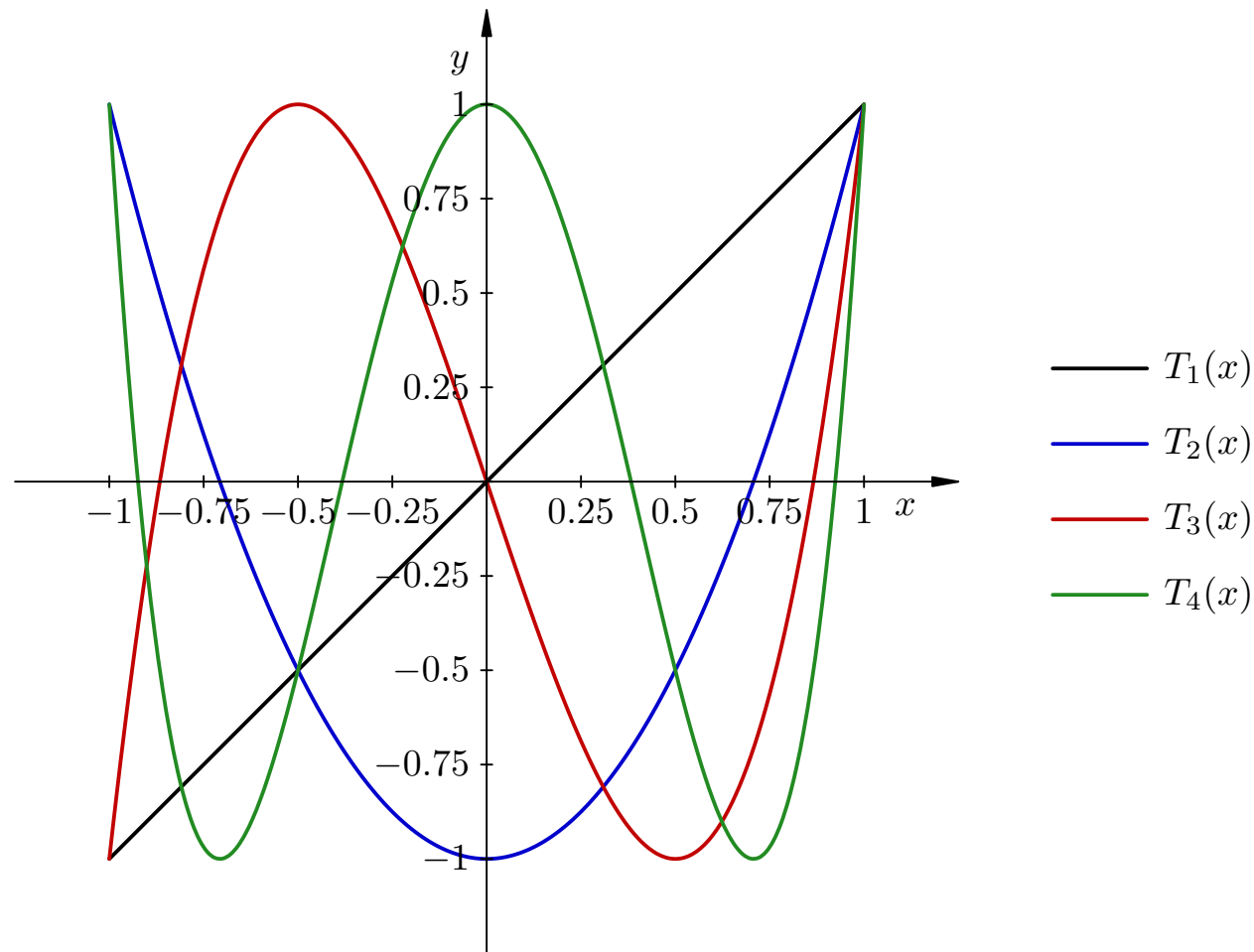
Vrijednost Čebiševljevog polinoma u ekstremu je

$$T_{n+1}(x'_k) = (-1)^k, \quad k = 0, \dots, n+1.$$

Primijetite da tih ekstrema ima točno $n+2$ (rubovi -1 i 1 su uključeni) i da pripadne vrijednosti alterniraju po znaku.

Čebiševljevi polinomi — graf

Graf prvih nekoliko Čebiševljevih polinoma T_n na $[-1, 1]$.



Čebiševljevi polinomi — svojstvo minimizacije

Čebiševljevi polinomi T_n imaju važno svojstvo **minimizacije** “**uniformnog otklona** polinoma od **nule**” na segmentu $[-1, 1]$.

Teorem. Za zadani prirodni broj n , promatrajmo **minimizacijski** problem

$$\tau_n := \inf_{\deg(P) \leq n-1} \left\{ \max_{-1 \leq x \leq 1} |x^n + P(x)| \right\},$$

gdje je P polinom. **Minimum** τ_n se **dostiže** samo za polinom

$$x^n + P(x) = \frac{1}{2^{n-1}} T_n(x).$$

Pripadna pogreška ili “**otklon** od **nule**” je $\tau_n = \frac{1}{2^{n-1}}$.

Čebiševljevi polinomi — svojstvo minimizacije

Dokaz. Iz tročlane rekurzije, nije teško induktivno dokazati da je vodeći koeficijent u T_n jednak 2^{n-1} , tj. da je

$$T_n(x) = 2^{n-1}x^n + \text{članovi nižeg stupnja}, \quad n \geq 1.$$

Zbog toga vrijedi da je

$$\frac{1}{2^{n-1}} T_n(x) = x^n + \text{članovi nižeg stupnja.}$$

Točke

$$x'_k = \cos \frac{k\pi}{n}, \quad k = 0, \dots, n,$$

su lokalni ekstremi od T_n na $[-1, 1]$.

Čebiševljevi polinomi — svojstvo minimizacije

Očito je

$$-1 = x'_n < x'_{n-1} < \cdots < x'_1 < x'_0 = 1.$$

U tim točkama je

$$T_n(x'_k) = \cos(k\pi) = (-1)^k, \quad k = 0, \dots, n.$$

Polinom $\frac{1}{2^{n-1}} T_n$ ima vodeći koeficijent jednak 1 i vrijedi

$$\max_{-1 \leq x \leq 1} \left| \frac{1}{2^{n-1}} T_n \right| = \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Zbog toga je

$$\tau_n \leq \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Čebiševljevi polinomi — svojstvo minimizacije

Pokažimo da je τ_n baš **jednak** desnoj strani. Pretpostavimo **suprotno**, tj. da je

$$\tau_n < \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Pokazat ćemo da to vodi na **kontradikciju**.

Iz definicije τ_n preko **infimuma** i prethodne pretpostavke, zaključujemo da **postoji** polinom M takav da je

$$M(x) = x^n + P(x), \quad \deg(P) \leq n - 1,$$

za kojeg vrijedi

$$\tau_n \leq \max_{-1 \leq x \leq 1} |M(x)| < \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Čebiševljevi polinomi — svojstvo minimizacije

Definiramo

$$R(x) = \frac{1}{2^{n-1}} T_n(x) - M(x).$$

No, vodeći koeficijenti polinoma s desne strane se skrate, pa je

$$\deg(R) \leq n - 1.$$

Ispitajmo vrijednosti funkcije R u lokalnim ekstremima polinoma T_n . Iz gornje ograde za τ_n , redom, izlazi

$$R(x'_0) = R(1) = \frac{1}{2^{n-1}} - M(1) > 0,$$

$$R(x'_1) = -\frac{1}{2^{n-1}} - M(x'_1) < 0, \quad \dots$$

Čebiševljevi polinomi — svojstvo minimizacije

tj. za polinom R vrijedi

$$\text{sign}(R(x'_k)) = (-1)^k, \quad k = 0, \dots, n.$$

Budući da ima bar $n + 1$ različiti predznak, to mora postojati bar n nultočka, što je moguće samo ako je $R = 0$. Odatle odmah izlazi da je

$$M(x) = \frac{1}{2^{n-1}} T_n(x).$$

No, onda je $\max_{-1 \leq x \leq 1} |M(x)| = 1/2^{n-1}$, što je kontradikcija s $<$.

Sad bi još trebalo pokazati da je to **jedini** polinom s takvim svojstvom. Taj dio dokaza vrlo je **sličan** ovom što je već dokazano. Istim argumentom izlazi opet $M(x) = \frac{1}{2^{n-1}} T_n(x)$. ■

Interpolacija u Čebiševljevim točkama

Vratimo se sad polaznom problemu **optimalnog** izbora čvorova interpolacije.

Želimo izabrati čvorove interpolacije $x_k \in [-1, 1]$ tako da **minimiziraju**

$$\max_{-1 \leq x \leq 1} |(x - x_0) \cdots (x - x_n)|.$$

Polinom čvorova ω u prethodnoj relaciji je stupnja $n + 1$ i ima **vodeći** koeficijent **1**. Po Teoremu o **minimalnom otklonu**, **minimum** ćemo dobiti ako stavimo

$$\omega(x) = (x - x_0) \cdots (x - x_n) = \frac{1}{2^n} T_{n+1}(x),$$

a **minimalna** će vrijednost biti $\max_{-1 \leq x \leq 1} |\omega(x)| = 1/2^n$.

Interpolacija u Čebiševljevim točkama

Odatle odmah čitamo da su čvorovi x_0, \dots, x_n **nultočke** polinoma T_{n+1} . U **silaznom** poretku, te nultočke su

$$x_k = \cos \frac{(2k + 1)\pi}{2n + 2}, \quad k = 0, \dots, n.$$

Uzlazni poredak dobivamo **zamijenom** indeksa $k \mapsto n - k$.

Afinom transformacijom intervala $[-1, 1]$ u interval $[a, b]$,

$$x \in [-1, 1] \quad \mapsto \quad \frac{a + b}{2} + \frac{b - a}{2} \cdot x \in [a, b],$$

izlazi i opća formula za **Čebiševljeve** točke (**uzlazno**) u $[a, b]$

$$x_k = \frac{a + b}{2} + \frac{b - a}{2} \cdot \cos \frac{(2(n - k) + 1)\pi}{2n + 2}, \quad k = 0, \dots, n.$$

Jesmo li bar malo spašeni?

Problem u **Bernsteinovom** primjeru $f(x) = |x|$ i **Faberovom** teoremu je **preširoka** klasa funkcija, odnosno,

● **premala** glatkoća — samo **neprekidnost** za f .

Uz samo malo **jaču** glatkoću, ipak **jesmo** “spašeni”!

Teorem. Neka je $f \in C^1[-1, 1]$. Za svaki $n \in \mathbb{N}_0$, neka je p_n interpolacijski polinom za funkciju f na **Čebiševljevoj** mreži s $n + 1$ čvorova u intervalu $[-1, 1]$.

Niz polinoma p_n **uniformno konvergira** prema f na $[-1, 1]$, tj. vrijedi

$$\|f(x) - p_n(x)\|_\infty \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty. \quad \blacksquare$$

Dakle, imamo **uniformnu** konvergenciju interpolacije za **neprekidno derivabilne** funkcije na **Čebiševljevim** mrežama.

Hermiteova polinomna interpolacija

Hermiteova polinomna interpolacija

Osim interpolacije **funkcijskih vrijednosti** funkcije f u čvorovima x_k , možemo tražiti i interpolaciju **derivacije** f'

- da **derivacija** h' interpolacijskog polinoma h interpolira **derivaciju** f' u čvorovima x_k .

Dakle, zahtijevamo da je

$$h(x_k) = f(x_k), \quad h'(x_k) = f'(x_k), \quad k = 0, \dots, n.$$

Takva vrsta interpolacije zove se **Hermiteova interpolacija**.

Prvo, treba odgovoriti na nekoliko **važnih** pitanja:

- postoji** li takav interpolacijski polinom;
- ako postoji, je li **jedinstven**;
- ako postoji i jedinstven je, kojeg je **stupnja**.

Hermiteova polinomna interpolacija

Uvedimo **skraćene** oznake za vrijednosti f i f' u čvorovima

$$f_k := f(x_k), \quad f'_k = f'(x_k), \quad k = 0, \dots, n.$$

Problem **egzistencije** i **jedinstvenosti** Hermiteove interpolacije **konstruktivno** rješava sljedeći teorem.

Teorem. Postoji **jedinstveni** polinom h_{2n+1} , stupnja najviše $2n + 1$, koji zadovoljava interpolacijske uvjete

$$h_{2n+1}(x_k) = f_k, \quad h'_{2n+1}(x_k) = f'_k, \quad k = 0, \dots, n,$$

gdje su x_k međusobno **različite točke** i f_k, f'_k zadani realni brojevi.

Dokaz. Ideja = konstrukcija baze **nalik** na **Lagrangeovu**.

Hermiteova polinomna interpolacija

Tražimo “bazične polinome” $h_{k,0}$ i $h_{k,1}$, za $k = 0, \dots, n$, za koje vrijede tzv. “kardinalni” uvjeti interpolacije

$$h_{k,0}(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{za } i \neq k, \\ 1, & \text{za } i = k, \end{cases} \quad h'_{k,0}(x_i) = 0,$$

$$h_{k,1}(x_i) = 0, \quad h'_{k,1}(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{za } i \neq k, \\ 1, & \text{za } i = k. \end{cases}$$

Ako nađemo takve polinome $h_{k,0}$ i $h_{k,1}$, onda je

$$h_{2n+1}(x) = \sum_{k=0}^n (f_k h_{k,0}(x) + f'_k h_{k,1}(x)).$$

Hermiteova polinomna interpolacija

Deriviranjem polinoma $h_{2n+1}(x)$ izlazi

$$h'_{2n+1}(x) = \sum_{k=0}^n (f_k h'_{k,0}(x) + f'_k h'_{k,1}(x)),$$

pa lako vidimo da su ispunjeni svi uvjeti interpolacije

$$h_{2n+1}(x_i) = \sum_{k=0}^n (f_k h_{k,0}(x_i) + f'_k h_{k,1}(x_i)) = f_k,$$

$$h'_{2n+1}(x_i) = \sum_{k=0}^n (f_k h'_{k,0}(x_i) + f'_k h'_{k,1}(x_i)) = f'_k.$$

Ostaje još konstruirati polinome $h_{k,0}$ i $h_{k,1}$.

Hermiteova polinomna interpolacija

Tvrdimo da se $h_{k,0}$ i $h_{k,1}$ mogu napisati kao

$$h_{k,0}(x) = [1 - 2(x - x_k)\ell'_k(x_k)] \ell_k^2(x)$$

$$h_{k,1}(x) = (x - x_k) \ell_k^2(x),$$

gdje je ℓ_k odgovarajući polinom **Lagrangeove baze**.

Provjera da vrijednosti $h_{k,0}(x_i)$, $h'_{k,0}(x_i)$, $h_{k,1}(x_i)$ i $h'_{k,1}(x_i)$ zadovoljavaju tražene **uvjete** vrši se direktno — uvrštavanjem.

Budući da je ℓ_k polinom stupnja n ,

• onda su $h_{k,0}$ i $h_{k,1}$ stupnja $2n + 1$,

• pa je h_{2n+1} stupnja **najviše** $2n + 1$.

Time smo dokazali **egzistenciju**. Preostaje još **jedinstvenost**.

Hermiteova polinomna interpolacija

Primijetite da **funkcija pogreške** polinoma h

$$e_h(x) = f(x) - h_{2n+1}(x)$$

ima **dvostruke nultočke** u čvorovima x_0, \dots, x_n , jer i funkcija e_h , i njezina derivacija e'_h imaju nultočke u x_i , tj.

$$e_h(x_i) = 0, \quad e'_h(x_i) = 0.$$

Neka je q_{2n+1} bilo koji drugi polinom koji zadovoljava uvjete interpolacije. Za razliku p tih polinoma onda vrijedi

$$\begin{aligned} p(x) &= h_{2n+1}(x) - q_{2n+1}(x) \\ &= (f(x) - q_{2n+1}(x)) - (f(x) - h_{2n+1}(x)) \\ &= e_q(x) - e_h(x). \end{aligned}$$

Hermiteova polinomna interpolacija

Polinom p je stupnja najviše $2n + 1$ i

- ima dvostruke nultočke u čvorovima x_i , za $i = 0, \dots, n$, odnosno, ukupno ima barem $2n + 2$ nultočke.

Zaključak. Polinom p je nul-polinom, pa je h_{2n+1} jedinstven. ■

Zato što greška Hermiteovog interpolacijskog polinoma ima dvostruke nultočke u x_0, \dots, x_n , polinom čvorova ω_h jednak je

$$\omega_h(x) = (x - x_0)^2(x - x_1)^2 \cdots (x - x_n)^2 = \omega^2(x),$$

pri čemu je ω polinom čvorova Lagrangeove interpolacije.

Grešku Hermiteove interpolacije dobivamo na sličan način kao i kod Lagrangeove interpolacije.

Greška Hermiteove interpolacije

Jedine **razlike**: ovdje je h_{2n+1} stupnja $2n + 1$, a polinom čvorova je $\omega_h(x) = \omega^2(x)$.

Teorem. Neka su $x_0, \dots, x_n \in [a, b]$ međusobno **različiti** čvorovi, tj. $x_i \neq x_j$ za $i \neq j$, i neka $f^{(2n+2)}$ **postoji** na $[a, b]$.

Nadalje, neka je e_h **greška Hermiteovog** interpolacijskog polinoma h_{2n+1} za funkciju f na mreži čvorova x_0, \dots, x_n .

Za **svaku** točku $x \in [a, b]$, **postoji** točka $\xi \in (x_{\min}, x_{\max})$, gdje je

$$x_{\min} := \min\{x, x_0, \dots, x_n\}, \quad x_{\max} := \max\{x, x_0, \dots, x_n\},$$

takva da je

$$e_h(x) = f(x) - h_{2n+1}(x) = \omega^2(x) \frac{f^{(2n+2)}(\xi)}{(2n+2)!}.$$



Hermiteova interpolacija — Newtonova forma

Hermiteov interpolacijski polinom može se zapisati i u **Newtonovoj bazi** — što je zgodnije za računanje.

- Točke interpolacije su $x_0, x_0, x_1, x_1, \dots, x_n, x_n$, tj. svaka od njih je **dvostruki čvor**.

Pitanje: Što je **podijeljena razlika** u dvostrukom čvoru?

Neka su x_0 i $x_1 = x_0 + h$ dva čvora i pustimo da $h \rightarrow 0$. Tada je

$$\begin{aligned} f[x_0, x_0] &= \lim_{h \rightarrow 0} f[x_0, x_0 + h] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} = f'(x_0). \end{aligned}$$

Dakle, $f[x_k, x_k] = f'_k$ su baš **zadani** podaci! Uz tu modifikaciju, podijeljene razlike računaju se na **uobičajeni** način.

Podijeljene razlike

Tablica svih potrebnih podijeljenih razlika ima ovaj oblik:

x_k	$f[x_k]$	$f[x_k, x_{k+1}]$	$f[x_k, x_{k+1}, x_{k+2}]$	\cdots	$f[x_0, \dots, x_n]$
x_0	$f[x_0]$	$f'(x_0)$			
x_0	$f[x_0]$	$f[x_0, x_1]$	$f[x_0, x_0, x_1]$	\ddots	
x_1	$f[x_1]$	$f'(x_1)$	$f[x_0, x_1, x_1]$		\cdots
x_1	$f[x_1]$		$f[x_1, x_1, x_2]$		
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	
x_n	$f[x_n]$		$f[x_{n-1}, x_n, x_n]$		
x_n	$f[x_n]$	$f'(x_n)$			

Newtonov oblik interpolacijskog polinoma

Konačni izgled Hermiteovog interpolacijskog polinoma u Newtonovoj bazi je

$$\begin{aligned}h_{2n+1}(x) &= f[x_0] + f'(x_0)(x - x_0) + f[x_0, x_0, x_1](x - x_0)^2 \\ &\quad + f[x_0, x_0, x_1, x_1](x - x_0)^2(x - x_1) + \dots \\ &\quad + f[x_0, x_0, \dots, x_n, x_n](x - x_0)^2 \dots (x - x_{n-1})^2(x - x_n).\end{aligned}$$

Naziv “**Hermiteova interpolacija**” koristi se i za **općenitiju**, tzv. **proširenu Hermiteovu** (ili **Hermite–Birkhoff**) interpolaciju.

- 🔴 Ovdje se mogu interpolirati i **više** derivacije od prvih.
- 🔴 **Bitno**: u svakom čvoru x_i , “**redom**” se interpoliraju **funkcijska vrijednost** i prvih nekoliko **uzastopnih** derivacija, a broj podataka po čvoru može **varirati**.

Proširena Hermiteova interpolacija

I za proširenu Hermiteovu interpolaciju postoji jedinstveni interpolacijski polinom stupnja najviše $n = \text{broj podataka} - 1$.

Primjer. Nađite interpolacijski polinom koji interpolira redom zadane vrijednosti $f, f', \dots, f^{(n)}$ u čvoru x_0 .

U ovom primjeru, x_0 je $(n + 1)$ -struki čvor interpolacije. Za podijeljene razlike višeg reda s istim čvorovima vrijedi

$$f[\underbrace{x_0, \dots, x_0}_{(k+1) \text{ puta}}] = \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}, \quad k = 0, \dots, n,$$

čim $f^{(k)}(x_0)$ postoji, pa je interpolacijski polinom p_n jednak Taylorovom polinomu stupnja n , za funkciju f oko točke x_0 .

Preskakanje derivacija u interpolaciji

Ako dozvolimo “preskakanje” nekih derivacija u nekim točkama, problem interpolacije

ne mora uvijek imati jedinstveno rješenje.

Primjer. Nađite nužne i dovoljne uvjete za egzistenciju i jedinstvenost interpolacijskog polinoma $p \in \mathcal{P}_2$, za kojeg vrijedi

$$p(x_0) = f_0, \quad p'(x_1) = f'_1, \quad p(x_2) = f_2,$$

gdje su (x_0, f_0) , (x_1, f'_1) i (x_2, f_2) zadane točke, uz pretpostavku da je $x_0 \neq x_2$.

Rješenje. Mora biti $x_1 \neq (x_0 + x_2)/2 \iff$ regularnost matrice sustava za interpolaciju.

Interpolacija splajnovima

Interpolacija polinomima — zaključci

Polinomna interpolacija **visokog stupnja**

- može imati **vrlo loša svojstva** — između čvorova,
- i u praksi se **ne smije** koristiti.

Umjesto toga, koristi se

- po dijelovima polinomna** interpolacija, tj. na svakom podintervalu koristi se polinom **fiksnog, niskog** stupnja.

Pretpostavka: čvorovi interpolacije su **uzlazno numerirani**,

$$a = x_0 < x_1 < \cdots < x_n = b.$$

i baš u **njima** su **rubovi podintervala** za pojedine polinome. Može i drugačije (čvorovi su različiti od rubova). Međutim, ovo je zgodno za **neparne** stupnjeve polinoma.

Po dijelovima polinomna interpolacija

Na svakom podintervalu $[x_{k-1}, x_k]$ koristimo **polinom** fiksnog stupnja m , tj. tražimo da je

$$\varphi \Big|_{[x_{k-1}, x_k]} = p_k, \quad k = 1, \dots, n,$$

gdje je $p_k \in \mathcal{P}_m$.

Svaki polinom p_k (stupnja najviše m)

- **određen** je s $m + 1$ koeficijenata, i
- moramo odrediti koeficijente n takvih polinoma — na svakom intervalu po **jedan**.

Dakle, **ukupan broj koeficijenata** koje treba **odrediti** je

$$(m + 1) \cdot n.$$

Po dijelovima polinomna interpolacija

Interpolacijski uvjeti su

$$\varphi(x_k) = f_k, \quad k = 0, \dots, n,$$

što za **svaki** polinom p_k daje po 2 uvjeta

$$\begin{aligned} p_k(x_{k-1}) &= f_{k-1}, \\ p_k(x_k) &= f_k, \end{aligned} \quad \text{za } k = 1, \dots, n,$$

odnosno, **ukupno** imamo $2n$ uvjeta interpolacije.

Digresija. Ovi uvjeti interpolacije osiguravaju **neprekidnost** funkcije φ u svim “unutarnjim” čvorovima mreže x_1, \dots, x_{n-1} , jer je

$$p_k(x_k) = p_{k+1}(x_k) = f_k, \quad k = 1, \dots, n - 1.$$

Po dijelovima polinomna interpolacija

Zaključak.

- Uvjeta interpolacije je $2n$, a
- treba naći $(m + 1) \cdot n$ koeficijenata.

Bez dodatnih uvjeta, to je moguće napraviti

- samo za $m = 1$,
- tj. za po dijelovima linearnu interpolaciju.

Za $m > 1$,

- dodaju se uvjeti na glatkoću interpolacijske funkcije φ u (unutarnjim) čvorovima mreže za podintervale.

Uz naš dogovor, to su upravo i čvorovi interpolacije.

Po dijelovima linearna interpolacija

Osnovna ideja po dijelovima linearne interpolacije je:

- umjesto jednog polinoma visokog stupnja,
- koristi se više polinoma, ali stupnja 1.

Na svakom podintervalu $[x_{k-1}, x_k]$, polinom p_k je stupnja 1

- i jedinstveno je određen iz uvjeta interpolacije.

Zapisujemo ga relativno obzirom na početnu točku intervala (stabilnost) u obliku

$$p_k(x) = c_{0,k} + c_{1,k}(x - x_{k-1}),$$

gdje je $x \in [x_{k-1}, x_k]$, za $k = 1, \dots, n$.

Po dijelovima linearna interpolacija

Interpolacijski polinom p_k zapisujemo u **Newtonovoj formi**

$$p_k(x) = f[x_{k-1}] + f[x_{k-1}, x_k] \cdot (x - x_{k-1}),$$

pa je očito

$$c_{0,k} = f[x_{k-1}] = f_{k-1},$$

$$c_{1,k} = f[x_{k-1}, x_k] = \frac{f_k - f_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}, \quad k = 1, \dots, n.$$

Za aproksimaciju vrijednosti funkcije f u **jednoj točki** $x \in [a, b]$, treba

- prvo pronaći **indeks** k takav da vrijedi $x \in [x_{k-1}, x_k]$,
- a onda izračunati **vrijednost** $p_k(x)$ pripadnog **linearnog polinoma** p_k na tom podintervalu.

Po dijelovima linearna interpolacija

Za traženje tog intervala koristimo **binarno pretraživanje**.

Binarno pretraživanje

```
low = 0;
high = n;
dok je (high - low) > 1 radi {
    /* U sljedećoj liniji cjelobrojno dijeljenje */
    mid = (low + high) / 2;
    ako je x < x[mid] onda
        high = mid;
    inače
        low = mid;
};
```

Trajanje ovog algoritma je proporcionalno s $\log_2(n)$.

Greška po dijelovima linearne interpolacije

Ako je funkcija f klase $C^2[a, b]$, onda je pogreška takve interpolacije, zapravo,

• **maksimalna** pogreška od n linearnih interpolacija.

Na svakom podintervalu $[x_{k-1}, x_k]$, pogreška je

• **greška linearne interpolacije** polinomom p_k .

Ocjena **lokalne** pogreške, ovisna o točki x , je

$$|f(x) - p_k(x)| \leq |\omega_k(x)| \frac{M_2^k}{2!},$$

pri čemu je

$$\omega_k(x) = (x - x_{k-1})(x - x_k), \quad M_2^k = \max_{x \in [x_{k-1}, x_k]} |f''(x)|.$$

Greška po dijelovima linearne interpolacije

Nađimo **maksimum** po **apsolutnoj** vrijednosti za $\omega_k(x)$ na zatvorenom intervalu $[x_{k-1}, x_k]$.

Funkcija $|\omega_k|$ može imati **maksimum** samo na otvorenom intervalu (x_{k-1}, x_k) — u rubovima je vrijednost 0.

Deriviranjem dobivamo da se lokalni ekstrem funkcije

$$\omega_k(x) = (x - x_{k-1})(x - x_k),$$

postiže u polovištu $x_e = (x_{k-1} + x_k)/2$ (tjeme **parabole**).

Vrijednost funkcije ω_k u lokalnom ekstremu je

$$\omega_k(x_e) = (x_e - x_{k-1})(x_e - x_k) = -\frac{(x_k - x_{k-1})^2}{4}.$$

Greška po dijelovima linearne interpolacije

Za bilo koji $x \in (x_{k-1}, x_k)$ je $\omega_k(x) < 0$, pa je x_e

- točka lokalnog **minimuma** za ω_k , odnosno,
- točka lokalnog **maksimuma** za $|\omega_k|$, tj. vrijedi

$$|\omega_k(x)| \leq |\omega_k(x_e)| = \frac{(x_k - x_{k-1})^2}{4}, \quad \forall x \in [x_{k-1}, x_k].$$

Neka je h **maksimalni razmak čvorova** po svim podintervalima

$$h := \max_{k=1, \dots, n} \{h_k := x_k - x_{k-1}\},$$

i neka je M_2 **maksimum** apsolutne vrijednosti f'' na cijelom intervalu $[a, b]$

$$M_2 := \max_{k=1, \dots, n} \{M_2^k\} = \max_{x \in [a, b]} |f''(x)|.$$

Greška po dijelovima linearne interpolacije

Na cijelom intervalu $[a, b]$, onda možemo pisati

$$|f(x) - \varphi(x)| \leq \frac{h^2}{4} \cdot \frac{M_2}{2!} = \frac{1}{8} h^2 M_2.$$

Zaključak. Ako **ravnomjerno povećavamo** broj čvorova, tako da maksimalni razmak čvorova $h \rightarrow 0$,

- onda i **maksimalna** greška teži u 0, tj.
- dobivamo **uniformnu** konvergenciju!

Na primjer, za **ekvidistantne mreže**, za koje je

$$x_k = a + kh, \quad h = \frac{b - a}{n},$$

pogreška je reda veličine h^2 , odnosno, n^{-2} .

Komentar na po dijelovima linearnu interpolaciju

Mane po dijelovima **linearne** interpolacije:

- Potrebno je **dosta podintervala** da se dobije **umjerena točnost** aproksimacije.
- Na primjer, za $h = 0.01$, tj. za $n = 100$, greška aproksimacije je reda veličine 10^{-4} , do na faktor $M_2/8$.
- Funkcija φ **nije dovoljno glatka** — samo je **neprekidna**.

Primjer za linearnu splajn interpolaciju

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Primjer. Funkciju

$$f(x) = \ln x$$

na intervalu $[1, 100]$ aproksimiramo po dijelovima linearnom interpolacijom, s točnošću $\varepsilon = 10^{-4}$, koju tražimo na cijelom intervalu.

Nađite broj čvorova interpolacije $n + 1$ potrebnih da se postigne ta točnost ε , uz

- (a) ekvidistantnu mrežu na cijelom intervalu,
- (b) interval $[1, 100]$ podijelimo na tri podintervala $[1, 2]$, $[2, 7]$, $[7, 100]$ i na svakom od njih koristimo posebnu ekvidistantnu mrežu.

Po obje metode nađite aproksimaciju za $\ln 2$.

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Rješenje. Za po dijelovima linearnu interpolaciju φ vrijedi sljedeća ocjena pogreške

$$|f(x) - \varphi(x)| \leq \frac{1}{8} h^2 M_2.$$

Ako je mreža **ekvidistantna** na $[a, b]$, onda je

$$h = \frac{b - a}{n},$$

pri čemu je n **broj** podintervala interpolacije.

Tražimo li **točnost** ε , onda mora biti

$$|f(x) - \varphi(x)| \leq \varepsilon.$$

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Da bi se to postiglo, **dovoljno** je zatražiti da je

$$\frac{1}{8} h^2 M_2 = \frac{1}{8} \left(\frac{b-a}{n} \right)^2 M_2 \leq \varepsilon.$$

Odatle odmah slijedi da mora biti

$$n \geq (b-a) \sqrt{\frac{M_2}{8\varepsilon}}.$$

Sada još samo treba izračunati M_2 . Deriviranjem dobivamo

$$f''(x) = -\frac{1}{x^2}.$$

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Budući da je f'' negativna, strogo rastuća funkcija, onda je maksimum njezine apsolutne vrijednosti na lijevom rubu, tj.

$$M_2 = \max_{x \in [a,b]} \left| -\frac{1}{x^2} \right| = \frac{1}{a^2}.$$

Rješenje za (a). Na intervalu $[1, 100]$ je $M_2 = 1$. Dobivamo

$$n \geq (100 - 1) \sqrt{\frac{1}{8 \cdot 10^{-4}}} = \frac{9900}{\sqrt{8}} \approx 3500.1785667,$$

pa je $n = 3501$, dok je broj čvorova $n + 1 = 3502$.

Da bismo odredili aproksimaciju za $\ln 2$, moramo naći u kojem podintervalu se nalazi točka $x_* = 2$.

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Ako je x_* u podintervalu $[x_{k-1}, x_k]$, mora biti

$$a + (k - 1) \cdot \frac{b - a}{n} \leq x_* \leq a + k \cdot \frac{b - a}{n}.$$

U našem slučaju je $x_* = 2$. Onda dobivamo

$$1 + (k - 1) \cdot \frac{99}{3501} \leq 2 \leq 1 + k \cdot \frac{99}{3501}$$

$$(k - 1) \cdot \frac{99}{3501} \leq 1 \leq k \cdot \frac{99}{3501}$$

$$(k - 1) \leq \frac{3501}{99} \leq k$$

$$(k - 1) \leq 35.\dot{3}\dot{6} \leq k.$$

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Prema tome, $k = 36$, $x_{35} \approx 1.9897172240$, $x_{36} \approx 2.0179948590$, pa imamo tablicu **podijeljenih razlika**

x_k	$f[x_k]$	$f[x_k, x_{k+1}]$
1.9897172240	0.6879925301	
		0.4990461264
2.0179948590	0.7021043744	

Interpolacijski polinom na tom **podintervalu** onda glasi:

$$p_1(x) = 0.6879925301 + 0.4990461264(x - 1.9897172240),$$

pa je

$$p_1(2) = 0.6931241097, \quad |\ln(2) - p_1(2)| = 0.0000230709.$$

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Rješenje za (b). Na intervalu $[1, 2]$ je $M_2 = 1$, pa je

$$n_1 \geq (2 - 1) \sqrt{\frac{1}{8 \cdot 10^{-4}}} = \frac{100}{\sqrt{8}} \approx 35.3535,$$

pa je $n_1 = 36$.

Na intervalu $[2, 7]$ je $M_2 = \frac{1}{4}$, pa je

$$n_2 \geq (7 - 2) \sqrt{\frac{\frac{1}{4}}{8 \cdot 10^{-4}}} = \frac{500}{2\sqrt{8}} \approx 88.388834765,$$

pa je $n_2 = 89$.

Primjer — po dijelovima linearna interpolacija

Na intervalu $[7, 100]$ je $M_2 = \frac{1}{49}$, pa je

$$n_3 \geq (100 - 7) \sqrt{\frac{\frac{1}{49}}{8 \cdot 10^{-4}}} = \frac{9300}{7\sqrt{8}} \approx 469.7209334,$$

pa je $n_3 = 470$.

Ukupan broj podintervala je $n = n_1 + n_2 + n_3 = 595$, što je skoro **6 puta manje** nego u (a). Broj čvorova je **596**.

Budući da je **2 čvor** interpolacije, onda nemamo što računati, i vrijednost u čvoru je upravo $\ln 2 \approx 0.6931471806$.