

**Записки към упражненията по Числени методи
сп. Информатика**

ас. Здравка Недялкова
гл. ас. д-р Тихомир Иванов



Съдържание

3	Полиноми на Чебишов	2
4	Разделени разлики. Интерполационна формула на Нютон	4
5	Крайни разлики	11
6	Интерполационна задача на Ермит. Разделени разлики с кратни възли	18
7	Системи на Чебишов. Интерполиране с тригонометрични полиноми	24
7.1	Системи на Чебишов	24
7.2	Интерполиране с тригонометрични полиноми	29
8	Сплайн функции. Интерполиране с кубични сплайни	33
8.1	Сплайн функции	33
8.2	Интерполиране с кубични сплайни	38
9	В-сплайни	43
10	Приближение в линейни нормирани пространства. Равномерно приближение на непрекъснати функции с алгебрични полиноми	49
10.1	Приближение в линейни нормирани пространства	49
10.2	Равномерно приближение на непрекъснати функции с алгебрични полиноми	51

Упражнение 3

Полиноми на Чебишов

(Продължение)

Задача 4. Нека $P(x) \in \pi_n$ и $|P(\eta_k)| \leq 1, k = \overline{0, n}$, където η_k са точките на алтернанс за $T_n(x)$ (т.е. $\eta_k = \cos \frac{k\pi}{n}, k = \overline{0, n}$). Да се докаже, че $|P(x)| \leq |T_n(x)|, |x| > 1$.

Доказателство. Нека $\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_n$ са точките на алтернанс. Да разгледаме интерполационните полиноми за $P(x)$ и $T_n(x)$, построени за възли η_k :

$$P(x) \stackrel{\in \pi_n}{=} L_n(P; x) = \sum_{k=0}^n P(\eta_k) l_{kn}(x), \quad (3.1)$$

$$T_n(x) \stackrel{\in \pi_n}{=} L_n(T_n; x) = \sum_{k=0}^n T_n(\eta_k) l_{kn}(x) = \sum_{k=0}^n (-1)^k l_{kn}(x). \quad (3.2)$$

Ще използваме последните две, за да покажем, че $|P(x)| \leq |T_n(x)|, |x| > 1$.

- Нека $x > 1$. Имаме

$$|P(x)| \stackrel{(3.1)}{=} \left| \sum_{k=0}^n P(\eta_k) l_{kn}(x) \right| \leq \sum_{k=0}^n |P(\eta_k) l_{kn}(x)| \stackrel{|P(\eta_k)| \leq 1}{\leq} \sum_{k=0}^n |l_{kn}(x)|. \quad (3.3)$$

Нашата цел е да ограничим последното отгоре от $T_n(x)$, затова ще намерим връзка между $|l_{kn}(x)|$ и $|T_n(x)|$. В случая, ще използваме, че $|l_{kn}(x)| = \text{sign}(l_{kn}(x)) l_{kn}(x)$. Знаем, че

$$l_{kn}(x) = \prod_{i=0, i \neq k}^n \frac{x - \eta_i}{\eta_k - \eta_i} = \frac{(x - \eta_0)(x - \eta_1) \dots (x - \eta_{k-1})(x - \eta_{k+1}) \dots (x - \eta_n)}{(\eta_k - \eta_0)(\eta_k - \eta_1) \dots (\eta_k - \eta_{k-1})(\eta_k - \eta_{k+1}) \dots (\eta_k - \eta_n)}.$$

Да определим знака му. Имаме:

$$l_{kn}(x) = \frac{\overbrace{(x - \eta_0)}^{>0} \overbrace{(x - \eta_1)}^{>0} \dots \overbrace{(x - \eta_{k-1})}^{>0} \overbrace{(x - \eta_{k+1})}^{>0} \dots \overbrace{(x - \eta_n)}^{>0}}{\underbrace{(\eta_k - \eta_0)}_{<0} \underbrace{(\eta_k - \eta_1)}_{<0} \dots \underbrace{(\eta_k - \eta_{k-1})}_{<0} \underbrace{(\eta_k - \eta_{k+1})}_{>0} \dots \underbrace{(\eta_k - \eta_n)}_{>0}},$$

откъдето следва, че $|l_{kn}(x)| = (-1)^k l_{kn}(x)$. Заместваме в (3.3):

$$|P(x)| \leq \sum_{k=0}^n |l_{kn}(x)| = \sum_{k=0}^n (-1)^k l_{kn}(x) = \sum_{k=0}^n T_n(\eta_k) l_{kn}(x) \stackrel{(3.2)}{=} T_n(x) = |T_n(x)|.$$

За последното равенство използвахме факта, че $|T_n(x)| = T_n(x), x > 1$.

- Нека $x < -1$. Постъпваме аналогично.

$$|P(x)| \stackrel{(3.1)}{=} \left| \sum_{k=0}^n P(\eta_k) l_{kn}(x) \right| \leq \sum_{k=0}^n |P(\eta_k) l_{kn}(x)| \stackrel{|P(\eta_k)| \leq 1}{\leq} \sum_{k=0}^n |l_{kn}(x)|.$$

Определяме знака на $l_{kn}(x)$:

$$l_{kn}(x) = \frac{\overbrace{(x - \eta_0)}^{<0} \overbrace{(x - \eta_1)}^{<0} \dots \overbrace{(x - \eta_{k-1})}^{<0} \overbrace{(x - \eta_{k+1})}^{<0} \dots \overbrace{(x - \eta_n)}^{<0}}{\underbrace{(\eta_k - \eta_0)}_{<0} \underbrace{(\eta_k - \eta_1)}_{<0} \dots \underbrace{(\eta_k - \eta_{k-1})}_{<0} \underbrace{(\eta_k - \eta_{k+1})}_{>0} \dots \underbrace{(\eta_k - \eta_n)}_{>0}}.$$

От последното следва, че

$$|l_{kn}(x)| = (-1)^{n+k} l_{kn}(x)$$

и следователно

$$|P(x)| \leq \sum_{k=0}^n |l_{kn}(x)| = \sum_{k=0}^n (-1)^{n+k} l_{kn}(x) = (-1)^n \sum_{k=0}^n T_n(\eta_k) l_{kn}(x) \stackrel{(3.2)}{=} (-1)^n T_n(x) = |T_n(x)|.$$

Последното равенство следва от факта, че $T_n(x) > 0$ при n – четно и $T_n(x) < 0$ при n – нечетно за всяко $x < -1$.

□

Упражнение 4

Разделени разлики.

Интерполационна формула на Нютон

Досега в упражненията разгледахме интерполационната задача на Лагранж – постановка, как да определим полинома, чиято графика минава през дадени точки, как да намерим оценка на грешката при това приближение и кои възли ни дават „най-добра“ такава оценка. Нека накратко припомним постановката на задачата. Търсим $p(x) \in \pi_n$ такъв, че $p(x_i) = y_i$, $i = \overline{0, n}$, където x_i са различни възли, а y_0, \dots, y_n са дадени стойности. Както казахме, полиномът на Лагранж може да бъде намерен като например:

- решим получената система за неизвестните коефициенти на полинома a_0, a_1, \dots, a_n .
- използваме интерполационната формула на Лагранж

$$p(x) = \sum_{k=0}^n y_k l_{kn}(x),$$

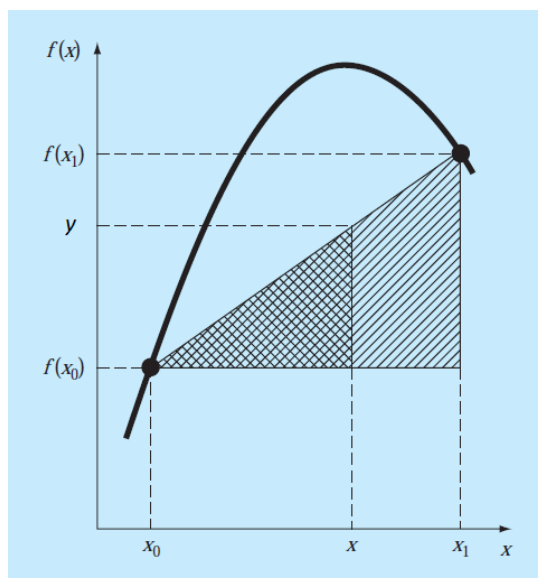
където $l_{kn}(x)$ са базисните полиноми на Лагранж.

В тази секция ще разгледаме още една формула, по която може да се намери интерполационният полином на Лагранж – известната формула на Нютон. Всъщност, исторически, Нютон първи е получил аналитична формула за намирането му. Да обърнем внимание, че аналитичните формули, по които може да се построи полиномът, са различни, но полученният полином е **един и същ** (той е и единствен).

И така, преди да дадем общата формула на Нютон за намиране на полинома от π_n , ще разгледаме задачата в случая, когато търсим линеен и квадратичен интерполационен полином.

1. Линеен полином

Нека в равнината са дадени точки (x_0, y_0) и (x_1, y_1) . Търсим полином от π_1 , чиято графика минава през точките:



Нека (x, y) е произволна точка в равнината, лежаща върху правата, съответстваща на графиката на полинома. Лесно се вижда (например използвайки подобни триъгълници или факта, че наклонът на правата е постоянен), че е в сила

$$\frac{y - f(x_0)}{x - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}.$$

От последното следва, че

$$y = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0),$$

т.е. това е уравнението на правата и следователно търсеният полином е

$$p(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0).$$

Да обърнем внимание, че намерихме полинома във вида $p(x) = b_0 + b_1(x - x_0)$, където $b_0 = f(x_0)$, $b_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$.

2. Квадратична интерполация

Да намерим полинома от π_2 , който интерполира точките (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . Последния ще търсим във вида

$$p(x) = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1(x - x_0) + \mathbf{b}_2(x - x_0)(x - x_1).$$

След известно пресмятане, като се използват условията за интерполация (тук няма да се спираме на извеждането), ще получим

$$b_0 = f(x_0), \quad b_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}, \quad b_2 = \frac{\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}}{x_2 - x_0}.$$

Следователно търсеният полином е

$$p(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) + \frac{\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}}{x_2 - x_0}(x - x_0)(x - x_1).$$

Можем да постъпим аналогично за определяне на полинома на Лагранж от n -та степен, който отново ще търсим във вида

$$p(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) + \cdots + b_n(x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}).$$

Интересно

Причината да търсим полинома във вида

$$p(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) + \cdots + b_n(x - x_0) \cdots (x - x_{n-1})$$

е следната. Както казахме, базисните полиноми на Лагранж имат стойност 1 само в един от възлите – този, за който отговарят. Във формулата на Нютон полиномът се търси като линейна комбинация на друг базис:

$$1, x - x_0, (x - x_0)(x - x_1), (x - x_0)(x - x_1)(x - x_2), \dots, (x - x_0) \cdots (x - x_{n-1}).$$

Втората базисна функция се нулира в x_0 , следващата в x_0, x_1 и т.н. Благодарение на това, интерполационните условия водят до система с триъгълна матрица. Както знаем, решаването на такава система е непосредствено.

Преди да дадем общата формула на Нютон, ще въведем едно необходимо понятие.

Определение 1. Нека x_0, \dots, x_n са дадени различни точки. **Разделена разлика** от n -ти ред на функцията f в точките x_0, \dots, x_n ще бележим с $f[x_0, \dots, x_n]$ и дефинираме с рекурентната връзка

$$f[x_0, \dots, x_n] = \frac{f[x_1, \dots, x_n] - f[x_0, \dots, x_{n-1}]}{x_n - x_0}, \quad n = 1, 2, \dots,$$

като $f[x_i] = f(x_i), \forall i$.

Преди да продължим, ще разгледаме един кратък пример.

Пример 1. Да се намери $f[x_0, x_1, x_2]$, ако $x_0 = 0, x_1 = 1, x_2 = 2$ и $f(x_0) = 0, f(x_1) = -1, f(x_2) = 1$.

Решение. От дефиницията следва, че

$$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0}.$$

Последното означава, че за да пресметнем разделената разлика от втори ред $f[x_0, x_1, x_2]$, трябва да пресметнем разделените разлики от първи $f[x_1, x_2]$ и $f[x_0, x_1]$. И така:

$$\begin{aligned} f[x_0, x_1] &= \frac{f[x_1] - f[x_0]}{x_1 - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} = \frac{-1 - 0}{1 - 0} = -1; \\ f[x_1, x_2] &= \frac{f[x_2] - f[x_1]}{x_2 - x_1} = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = \frac{1 - (-1)}{2 - 1} = 2. \end{aligned}$$

Заместваме полученото във формулата за разделената разлика от втори ред:

$$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{2 - (-1)}{2 - 0} = \frac{3}{2}.$$

□

Връзката между понятието разделена разлика и интерполационния полином на Лагранж се открива в следната теорема.

Теорема 1. Разделената разлика $f[x_0, \dots, x_n]$ съвпада с коефициента пред x^n в интерполационния полином на Лагранж $L_n(f; x)$ за функцията f с възли x_0, \dots, x_n .

Като се използва последната теорема, може да се изведе формулата на Нютон за интерполационния полином на Лагранж:

$$L_n(f; x) = f(x_0) + f[x_0, x_1](x - x_0) + f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) + \dots + f[x_0, \dots, x_n](x - x_0) \dots (x - x_{n-1})$$

или записана еквивалентно

$$L_n(f; x) = \sum_{k=0}^n f[x_0, \dots, x_k](x - x_0) \dots (x - x_{k-1}),$$

като допълнително приемем, че $(x - x_0) \dots (x - x_{k-1}) = 1$, при $k = 0$.

Задачата за намиране на интерполационния полином на Лагранж чрез формулата на Нютон се свежда до определянето на разделените разлики в горепосочената формула. Тъй като формулата е рекурсивна, на практика се използва следната, удобна за компютърна реализация, схема (например за възли x_0, \dots, x_5):

x	$f(x)$	First divided differences	Second divided differences	Third divided differences
x_0	$f[x_0]$			
		$f[x_0, x_1] = \frac{f[x_1] - f[x_0]}{x_1 - x_0}$		
x_1	$f[x_1]$		$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0}$	
		$f[x_1, x_2] = \frac{f[x_2] - f[x_1]}{x_2 - x_1}$		$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = \frac{f[x_1, x_2, x_3] - f[x_0, x_1, x_2]}{x_3 - x_0}$
x_2	$f[x_2]$		$f[x_1, x_2, x_3] = \frac{f[x_2, x_3] - f[x_1, x_2]}{x_3 - x_1}$	
		$f[x_2, x_3] = \frac{f[x_3] - f[x_2]}{x_3 - x_2}$		$f[x_1, x_2, x_3, x_4] = \frac{f[x_2, x_3, x_4] - f[x_1, x_2, x_3]}{x_4 - x_1}$
x_3	$f[x_3]$		$f[x_2, x_3, x_4] = \frac{f[x_3, x_4] - f[x_2, x_3]}{x_4 - x_2}$	
		$f[x_3, x_4] = \frac{f[x_4] - f[x_3]}{x_4 - x_3}$		$f[x_2, x_3, x_4, x_5] = \frac{f[x_3, x_4, x_5] - f[x_2, x_3, x_4]}{x_5 - x_2}$
x_4	$f[x_4]$		$f[x_3, x_4, x_5] = \frac{f[x_4, x_5] - f[x_3, x_4]}{x_5 - x_3}$	
		$f[x_4, x_5] = \frac{f[x_5] - f[x_4]}{x_5 - x_4}$		
x_5	$f[x_5]$			

Нека сега приложим формулата на Нютон за конкретна задача.

Задача 1. Да се намери интерполационният полином на Лагранж във форма на Нютон, интерполиращ функцията $f(x) = \sqrt{x}$ в т. 0, 1, 4.

Решение. Да запишем първо интерполационните условия в таблица

x	0	1	4
y	0	1	2

Търсим полинома във вида

$$L_2(f; x) = f[x_0] + f[x_0, x_1](x - x_0) + f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1).$$

Да пресметнем разделените разлики, като попълним съответната таблица.

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2
$x_0 = 0$	$f[x_0] = 0$		
		$f[x_0, x_1] = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} = 1$	
$x_1 = 1$	$f[x_1] = 1$		$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0} = -\frac{1}{6}$
		$f[x_1, x_2] = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = \frac{1}{3}$	
$x_2 = 4$	$f[x_2] = 2$		

Замествахме получените разделени разлики и получаваме

$$L_2(f; x) = 0 + 1(x - 0) - \frac{1}{6}(x - 0)(x - 1) = \frac{7}{6}x - \frac{1}{6}x^2.$$

Забележка: Подробно решена задача може да намерите и тук: [Newton's divided differences formula](#) \square

Вече показахме как се намира интерполационният полином на Лагранж, като се използва формулата на Нютон. Сега ще се спрем на няколко интересни свойства на разделената разлика. Нека първо отбележим, че от дефиницията на разделена разлика става ясно, че всяка разделена разлика се представя като линейна комбинация на функционалните стойности на f в съответните възли. Нека сега го покажем.

Задача 2. Да се докаже, че

$$f[x_0, \dots, x_n] = \sum_{k=0}^n \frac{f(x_k)}{\omega'(x_k)}, \quad (4.1)$$

за $\omega(x) = (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_n)$.

Доказателство. За да докажем горното твърждение, ще използваме, че разделената разлика от n -ти ред съвпада с коефициента пред x^n в полинома на Лагранж. Нека припомним и формулата на Лагранж, записана чрез $\omega(x)$:

$$L_n(f; x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) l_{kn}(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) \frac{\omega(x)}{(x - x_k) \omega'(x_k)}.$$

От последната формула се вижда, че коефициентът пред x^n е $\sum_{k=0}^n \frac{f(x_k)}{\omega'(x_k)}$, откъдето следва исканото твърждение. \square

От последната задача се вижда, че разделената разлика е линейна комбинация на $f(x_k)$ с коефициенти $\frac{1}{\omega'(x_k)}$ за съответните възли:

$$f[x_0, \dots, x_n] = \frac{1}{\omega'(x_0)}f(x_0) + \frac{1}{\omega'(x_1)}f(x_1) + \dots + \frac{1}{\omega'(x_n)}f(x_n). \quad (4.2)$$

Ще казваме още, че разделената разлика е **линеен функционал**¹ от вида $\sum_{k=0}^n A_k f(x_k)$, където $A_k = \frac{1}{\omega'(x_k)}$.

Друг интересен факт за разделените разлики е, че те не зависят от подредбата на възлите. Лесно може да се покаже например, че $f[x_0, x_1] = f[x_1, x_0]$ или $f[x_0, x_1, x_2] = f[x_1, x_2, x_0]$. В общия случай на база само на рекурентната връзка това трудно може да се покаже, затова ще го покажем като използваме изведеното досега.

Задача 3. Докажете, че разделената разлика не зависи от подредбата на възлите, т.е.

$$f[x_0, \dots, x_n] = f[x_{i_0}, x_{i_1}, \dots, x_{i_n}],$$

където i_0, i_1, \dots, i_n е произволна пермутация.

¹Функционал е изображение, което приема функция и връща число. Пример за функционал е определеният интеграл. Линейният функционал F изпълнява условията $F(f + g) = F(f) + F(g)$ и $F(\lambda g) = \lambda F(g)$.

Доказателство. Тъй като разделената разлика от ред n съвпада с коефициента пред x^n , то, независимо от подредбата на възлите x_0, \dots, x_n , тя ще бъде едно и също число.

Забележка: Друг начин да се докаже последното е като се използва фактът, че разделената разлика е линейна комбинация на функционалните стойности, вж. (4.2). Това означава, че дори и да разместим местата на възлите в разделената разлика, линейната комбинация ще се запази. \square

Задача 4. Да се докаже, че $(f + cg)[x_0, \dots, x_n] = f[x_0, \dots, x_n] + cg[x_0, \dots, x_n]$, където $c \in R$, а f и g са дадени функции.

Доказателство. За доказателството отново ще използваме (4.2), т.е. $f[x_0, \dots, x_n] = \sum_{k=0}^n \frac{f(x_k)}{\omega'(x_k)}$.

От последното имаме

$$\begin{aligned} (f + cg)[x_0, \dots, x_n] &= \sum_{k=0}^n \frac{(f(x) + cg(x))|_{x=x_k}}{\omega'(x_k)} = \sum_{k=0}^n \frac{f(x_k) + cg(x_k)}{\omega'(x_k)} \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{f(x_k)}{\omega'(x_k)} + c \sum_{k=0}^n \frac{g(x_k)}{\omega'(x_k)} = f[x_0, \dots, x_n] + cg[x_0, \dots, x_n]. \end{aligned}$$

\square

Вече показахме, че ако $f \in \pi_n$, то интерполационният полином на Лагранж за f съвпада с f . Интересно свойство имат и разделените разлики, когато функцията, която интерполираме, е полином:

- Ако $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in \pi_n$, то $f[x_0, \dots, x_n] = a_n$;
- Ако $f \in \pi_{n-1}$, то $f[x_0, \dots, x_n] = 0$.

Задача 5. Да се докаже, че $\sum_{k=0}^n \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)} = 0$.

Доказателство. За доказателството ще използваме формула (4.1). След като я приложим за функцията $f(x) = \omega''(x)$ получаваме:

$$f[x_0, \dots, x_n] = \sum_{k=0}^n \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}.$$

Тъй като $f(x) = \omega''(x)$ е от степен $n - 1$ ($\omega(x)$ е от степен $n + 1$), то разделената разлика е равна на 0, откъдето следва и исканото твърждение. \square

Задача 6. Нека $x_k \neq 0, -1$ за $k = 1, \dots, n$. Докажете равенството

$$\sum_{k=1}^n \frac{x_k^n f\left(\frac{1}{x_k}\right)}{f'(x_k)(1+x_k)} = (-1)^n (x_1 x_2 \dots x_n - 1),$$

където $f(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)$.

Доказателство. Нека означим $x_{n+1} = -1$ и $\omega(x) = (x - x_1) \dots (x - x_n)(x - x_{n+1})$. Ще докажем твърдението поетапно.

- (а) Да разгледаме функцията $g(x) = x^n f\left(\frac{1}{x}\right)$, чиято стойност в т. x_k е равна на числителя. Имаме:

$$\begin{aligned}
g(x) &= x^n \left(\frac{1}{x} - x_1 \right) \left(\frac{1}{x} - x_2 \right) \dots \left(\frac{1}{x} - x_n \right) \\
&= \cancel{x}^n \frac{(1 - x_1 x)}{\cancel{x}} \frac{(1 - x_2 x)}{\cancel{x}} \dots \frac{(1 - x_n x)}{\cancel{x}} = ((-1)^n x_1 \dots x_n) x^n + \dots
\end{aligned}$$

Следователно

$$g[x_1, \dots, x_{n+1}] = (-1)^n x_1 \dots x_n \quad (4.3)$$

(б) Ще покажем, че знаменателят в сумата е равен на $\omega'(x_k)$. Да припомним първо, че

$$f'(x_k) = (x_k - x_1)(x_k - x_2) \dots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \dots (x_k - x_n). \quad (4.4)$$

От друга страна,

$$\omega'(x_k) = (x_k - x_1)(x_k - x_2) \dots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \dots (x_k - x_n)(x_k - x_{n+1}). \quad (4.5)$$

От (4.4) и (4.5) следва, че

$$\omega'(x_k) = (x_k - x_{n+1}) f'(x_k) = (x_k + 1) f'(x_k).$$

След като заместим полученото дотук в търсената сума от условието, получаваме

$$\sum_{k=1}^n \frac{x_k^n f(1/x_k)}{f'(x_k)(1+x_k)} = \sum_{k=1}^n \frac{g(x_k)}{\omega'(x_k)}.$$

За функцията g обаче намерихме разделената разлика от n -ти ред, вж. (а), и следователно ще изразим дясната страна в последното равенство чрез $g[x_1, \dots, x_{n+1}]$. Използваме (4.1):

$$\begin{aligned}
g[x_1, \dots, x_{n+1}] &= \sum_{k=1}^{n+1} \frac{g(x_k)}{\omega'(x_k)} = \sum_{k=1}^n \frac{g(x_k)}{\omega'(x_k)} + \frac{g(x_{n+1})}{\omega'(x_{n+1})} \\
&\iff \sum_{k=1}^n \frac{g(x_k)}{\omega'(x_k)} = g[x_1, \dots, x_{n+1}] - \frac{g(x_{n+1})}{\omega'(x_{n+1})}.
\end{aligned} \quad (4.6)$$

Остана да определим последните два члена.

- $g[x_1, \dots, x_{n+1}]$ = коефициента пред $x^n = (-1)^n x_1 x_2 \dots x_n$;
- $\frac{g(x_{n+1})}{\omega'(x_{n+1})} = \frac{g(-1)}{\omega'(-1)} = \frac{(-1)^n (-1 - x_1)(-1 - x_2) \dots (-1 - x_n)}{(-1 - x_1)(-1 - x_2) \dots (-1 - x_n)} = (-1)^n$.

Заместваме последното в (4.6) и получаваме исканото тъждество. \square

• Формула на Лагранж

Базисните полиноми на Лагранж зависят само от възлите на интерполация. Следователно, ако искаме да решим интерполационната задача с едни и същи възли, но различни съответстващи им стойности, можем да построим базисните полиноми само веднъж. Тогава в линейната комбинация на базисните полиноми ще променяме само коефициентите – $f(x_i)$.

• Формула на Нютон

Ако искаме да построим редица от интерполационните полиноми $L_1(f; x), L_2(f; x), \dots$, както следва – $L_1(f; x)$ интерполира f в точките x_0, x_1 , $L_2(f; x)$ интерполира f в точките x_0, x_1, x_2 и т.н., то е удобно да използваме формулата на Нютон. Тъй като за всеки нов полином добавяме по един възел, само ще трябва да допълним таблицата с разделени разлики и да прибавим съответния член към построения преди това полином. Ако сменим функционалните стойности обаче, ще трябва да пресметнем всички разделени разлики отначало!

Упражнение 5

Крайни разлики

В предишното упражнение разгледахме една нова формула за намиране на интерполационния полином на Лагранж – формулата на Нютон. Полиномът във формата на Нютон има следния вид:

$$L_n(f; x) = f[x_0] + f[x_0, x_1](x - x_0) + f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) + \dots + f[x_0, \dots, x_n](x - x_0) \dots (x - x_{n-1}).$$

Както казахме, той се търси като линейна комбинация на базисните функции

$$1, x - x_0, (x - x_0)(x - x_1), (x - x_0)(x - x_1)(x - x_2), \dots, (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}),$$

като коефициентите в полинома са така наречените разделени разлики, които можем лесно да пресметнем, използвайки следната схема:

x	$f(x)$	First divided differences	Second divided differences	Third divided differences
x_0	$f[x_0]$			
		$f[x_0, x_1] = \frac{f[x_1] - f[x_0]}{x_1 - x_0}$		
x_1	$f[x_1]$		$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0}$	
		$f[x_1, x_2] = \frac{f[x_2] - f[x_1]}{x_2 - x_1}$		$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = \frac{f[x_1, x_2, x_3] - f[x_0, x_1, x_2]}{x_3 - x_0}$
x_2	$f[x_2]$		$f[x_1, x_2, x_3] = \frac{f[x_2, x_3] - f[x_1, x_2]}{x_3 - x_1}$	
		$f[x_2, x_3] = \frac{f[x_3] - f[x_2]}{x_3 - x_2}$		$f[x_1, x_2, x_3, x_4] = \frac{f[x_2, x_3, x_4] - f[x_1, x_2, x_3]}{x_4 - x_1}$
x_3	$f[x_3]$		$f[x_2, x_3, x_4] = \frac{f[x_3, x_4] - f[x_2, x_3]}{x_4 - x_2}$	
		$f[x_3, x_4] = \frac{f[x_4] - f[x_3]}{x_4 - x_3}$		$f[x_2, x_3, x_4, x_5] = \frac{f[x_3, x_4, x_5] - f[x_2, x_3, x_4]}{x_5 - x_2}$
x_4	$f[x_4]$		$f[x_3, x_4, x_5] = \frac{f[x_4, x_5] - f[x_3, x_4]}{x_5 - x_3}$	
		$f[x_4, x_5] = \frac{f[x_5] - f[x_4]}{x_5 - x_4}$		
x_5	$f[x_5]$			

И така, всяка разделена разлика от вида $f[x_i, \dots, x_j]$ съдържа в знаменателя си разликата $x_j - x_i$. Нека сега изберем възлите x_i да са равноотдалечени, т.е. всеки два последователни възела да бъдат на разстояние h (още ще го наричаме стъпка), т.е. $x_1 = x_0 + h$, $x_2 = x_1 + h, \dots$ или, иначе казано, $x_i = x_0 + ih$, $i = 1, 2, \dots, n$. В този случай знаменателят в разделената разлика ще бъде един и същ за всяка разделена разлика от нашата таблица. Оказва се, че в случая на равноотдалечени възли е удобно знаменателите да се пропуснат и може да се изведе формула за интерполационния полином на база на така наречените **крайни разлики**.

Определение 2. Нека е дадена крайна редица от числа f_0, f_1, f_2, \dots , които са стойности на функцията f в точките x_0, x_1, x_2, \dots . Крайна разлика от k -ти ред за функцията f в точката x_i ще бележим с $\Delta^k f_i$ и дефинираме рекурентно

$$\Delta^k f_i = \Delta^{k-1} f_{i+1} - \Delta^{k-1} f_i, \quad k = 1, 2, \dots,$$

като $\Delta^0 f_i = f_i, \forall i$.

Нека отново разгледаме кратък пример.

Пример 2. Дадена е редицата от стойности $f_0 = 1$, $f_1 = 3$, $f_2 = -1$, $f_3 = 7$. Намерете $\Delta^2 f_1$ и $\Delta^3 f_0$.

Решение. Да пресметнем двете крайни разлики поотделно. Използваме рекурентната връзка и заместваме, като всеки път понижаваме реда на крайната разлика:

$$\Delta^2 f_1 = \Delta^1 f_2 - \Delta^1 f_1 = (f_3 - f_2) - (f_2 - f_1) = f_3 - 2f_2 + f_1 = 7 + 2 + 3 = 12;$$

$$\begin{aligned}\Delta^3 f_0 &= \Delta^2 f_1 - \Delta^2 f_0 = (\Delta^1 f_2 - \Delta^1 f_1) - (\Delta^1 f_1 - \Delta^1 f_0) = \Delta^1 f_2 - 2\Delta^1 f_1 + \Delta^1 f_0 \\ &= (f_3 - f_2) - 2(f_2 - f_1) + (f_1 - f_0) = f_3 - 3f_2 + 3f_1 - f_0 \\ &= 7 + 3 + 9 - 1 = 18.\end{aligned}$$

□

След малко ще покажем, че в интерполационната формула с равноотдалечени възли участват крайни разлики $\Delta^k f_0$ и тях ще намираме като използваме познатата ни, но модифицирана таблица:

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2	...
x_0	$\Delta^0 f_0 = f(x_0)$	$\Delta^1 f_0 = \Delta^0 f_1 - \Delta^0 f_0$	$\Delta^2 f_0 = \Delta^1 f_1 - \Delta^1 f_0$	
x_1	$\Delta^0 f_1 = f(x_1)$	$\Delta^1 f_1 = \Delta^0 f_2 - \Delta^0 f_1$	$\Delta^2 f_1 = \Delta^1 f_2 - \Delta^1 f_1$	
x_2	$\Delta^0 f_2 = f(x_2)$	$\Delta^1 f_2 = \Delta^0 f_3 - \Delta^0 f_2$...
x_3	$\Delta^0 f_3 = f(x_3)$			
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	

Да обърнем внимание, че

- неслучайно със символа Δ се означава крайна разлика. На езика на математиката, той често се използва като синоним на думата „изменение“;
- за да се пресметне $\Delta^k f_i$, се пресмята линейна комбинация на стойностите $f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+k}$, т.е. линейна комбинация на f_i и следващите k на брой стойности на f (да забележим, че коефициентите в горните примери са точно биномни коефициенти, т.е. коефициентите в развитието на Нютоновия бином, с редуващи се знаци).

Нека разгледаме някои важни свойства на крайната разлика, след което ще изведем интерполационния полином на Лагранж в случая на равноотдалечени възли. Преди ще припомним една важна лема, доказана на лекции.

Лема. Нека $x_i = x_0 + ih$, $i = 0, \dots, k$ и функцията $f(x)$ е определена в тези точки. Тогава

$$f[x_0, \dots, x_k] = \frac{\Delta^k f_0}{k!h^k}.$$

Доказателството на последната лема е непосредствено, като се използва индукция по броя на точките.

Последната лема ни дава връзка между разделената разлика от k -ти ред и крайната разлика от същия ред, взета в т. x_0 . Чрез последната връзка част от свойствата на разделената разлика се пренасят върху крайната:

- Крайната разлика е линеен функционал, т.е. $\Delta^n(f + cg)_i = \Delta^n f_i + c\Delta^n g_i$;
- Ако $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in \pi_n$, то $\Delta^n f_0 = n!h^n a_n$;
- Крайната разлика от n -ти ред е нула за всяка функция $f \in \pi_{n-1}$.

Нека сега разгледаме една аналитична формула за пресмятането на произволна крайна разлика от n -ти ред за функцията f , взета в т. x_i .

Задача 7. Да се докаже, че $\Delta^k f_i = \sum_{j=0}^k (-1)^{k-j} \binom{k}{j} f_{i+j}$.

Доказателство. Искаме да покажем, че крайната разлика от n -ти ред се представя във вида

$$\Delta^k f_i = (-1)^k \binom{k}{0} f_i + (-1)^{k-1} \binom{k}{1} f_{i+1} + \cdots - \binom{k}{k-1} f_{i+k-1} + \binom{k}{k} f_{i+k},$$

т.е. да покажем, че коефициентите в линейната комбинация пред стойностите f_i, \dots, f_{i+k} се определят еднозначно с горната формула. Ще използваме индукция по реда на крайната разлика, както и тъждеството

$$\binom{n}{k+1} + \binom{n}{k} = \binom{n+1}{k+1}. \quad (5.1)$$

База на индукцията. Проверяваме дали твърдението е изпълнено за $k = 1$:

$$\Delta^1 f_i = f_{i+1} - f_i = (-1)^1 \binom{1}{0} f_i + (-1)^0 \binom{1}{1} f_{i+1}.$$

Индукционна стъпка. Нека допуснем, че твърдението е вярно за някое n , т.е. е в сила

$$\Delta^n f_i = \sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f_{i+j}.$$

Ще покажем, че то е в сила и за $k = n + 1$, т.е. е изпълнено

$$\begin{aligned} \Delta^{n+1} f_i &= \sum_{j=0}^{n+1} (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} f_{i+j} \\ &= (-1)^{n+1} \underbrace{\binom{n+1}{0}}_1 f_i + (-1)^n \binom{n+1}{1} f_{i+1} + \cdots - \binom{n+1}{n} f_{i+n} + \underbrace{\binom{n+1}{n+1}}_1 f_{i+n+1}. \end{aligned}$$

Имаме

$$\begin{aligned} \Delta^{n+1} f_i &= \Delta^n f_{i+1} - \Delta^n f_i = \sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f_{i+j+1} - \sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f_{i+j} \\ &= \left((-1)^n \binom{n}{0} f_{i+1} + (-1)^{n-1} \binom{n}{1} f_{i+2} + \cdots + \binom{n}{n-2} f_{i+n-1} - \binom{n}{n-1} f_{i+n} + \binom{n}{n} f_{i+n+1} \right) \\ &\quad - \left((-1)^n \binom{n}{0} f_i + (-1)^{n-1} \binom{n}{1} f_{i+1} + \cdots + \binom{n}{n-2} f_{i+n-2} - \binom{n}{n-1} f_{i+n-1} + \binom{n}{n} f_{i+n} \right). \end{aligned}$$

Групираме членовете и получаваме, че последното е равно на

$$\begin{aligned} &(-1)^{n+1} \binom{n}{0} f_i + (-1)^n \left\{ \binom{n}{0} + \binom{n}{1} \right\} f_{i+1} + \cdots + \left\{ \binom{n}{n-1} + \binom{n}{n-2} \right\} f_{i+n-1} \\ &\quad - \left\{ \binom{n}{n} + \binom{n}{n-1} \right\} f_{i+n} + \binom{n}{n} f_{i+n+1}. \end{aligned}$$

Накрая, използвайки (5.1), имаме

$$\Delta^{n+1} f_i = (-1)^{n+1} \binom{n}{0} f_i + (-1)^n \binom{n+1}{1} f_{i+1} + \cdots + \binom{n+1}{n-1} f_{i+n-1} - \binom{n+1}{n} f_{i+n} + \binom{n+1}{n} f_{i+n+1}.$$

Тъй като $\binom{n}{0} = \binom{n+1}{0} = 1$ и $\binom{n}{n} = \binom{n+1}{n+1} = 1$, то

$$\Delta^{n+1} f_i = (-1)^{n+1} \binom{n+1}{0} f_i + \dots + \binom{n+1}{n-1} f_{i+n-1} - \binom{n+1}{n} f_{i+n} + \binom{n+1}{n+1} f_{i+n+1}.$$

□

Следствие 1. За всяко естествено число n е в сила формулата

$$\Delta^n f_0 = \sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f_j.$$

Последната задача ни дава формула, по която можем да пресметнем всяка крайна разлика от произволен ред, взета за съответните възли.

Задача 8. Пресметнете крайните разлики в пример 5, като използвате аналитичната формула.

Да обобщим накратко какво се случи дотук:

- В случая на равноотдалечени възли, т.е. $x_i = x_0 + ih$, $i = 1, 2, \dots, n$, разделените разлики във формулата на Нютон имат един и същ знаменател. Въведохме понятието крайна разлика;
- Връзката между разделена и крайна разлика се задава с тъждеството

$$f[x_0, \dots, x_k] = \frac{\Delta^k f_0}{k! h^k};$$

- За крайната разлика от n -ти ред е в сила

$$\Delta^n f_0 = \sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f_j.$$

За да направим връзка между интерполационната формула и крайната разлика, ще заместим разделената разлика в интерполационния полином във форма на Нютон, с еквивалентния ѝ израз, който получихме:

$$\begin{aligned} L_n(f; x) &= \sum_{k=0}^n f[x_0, \dots, x_k] (x - x_0) \dots (x - x_{k-1}) = \sum_{k=0}^n \frac{\Delta^k f_0}{k! h^k} (x - x_0) \dots (x - x_{k-1}) \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{\Delta^k f_0}{k! h^k} (x - x_0) (x - x_0 - h) (x - x_0 - 2h) \dots (x - x_0 - (k-2)h) (x - x_0 - (k-1)h). \end{aligned}$$

Тъй като навсякъде изразът $x - x_0$ се повтаря, ще го положим да бъде равно на th . Последното полагане избираме, за да можем да изнесем коефициент h от всяка една от скобите в сумата. Заместваме полагането:

$$\begin{aligned} L_n(f; x) &= \sum_{k=0}^n \frac{\Delta^k f_0}{k! h^k} (th) (th - h) (th - 2h) \dots (th - (k-2)h) (th - (k-1)h) \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{\Delta^k f_0}{k! h^k} h^k t (t-1) (t-2) \dots (t-k+2) (t-k+1). \end{aligned}$$

И така, за полагането $x - x_0 = th$ или еквивалентно $x = x_0 + th$, получихме

$$L_n(f; x) = L_n(f; x_0 + th) = \sum_{k=0}^n \frac{\Delta^k f_0}{k!} t (t-1) (t-2) \dots (t-k+2) (t-k+1).$$

В литературата означението $\binom{t}{k}$ се среща при произволни реални стойности на параметъра t . С него се означава биномната функция, която се определя от равенството

$$\binom{t}{k} := \begin{cases} \frac{t(t-1)\dots(t-k+1)}{k!}, & k > 0, \\ 1, & k = 0. \end{cases}$$

Неформално, можем да си мислим за горната формула като $\frac{t!}{k!(t-k)!}$. От последното следва, че интерполационният полином може да се запише като

$$L_n(f; x_0 + th) = \sum_{k=0}^n \Delta^k f_0 \binom{t}{k}.$$

Последната формула се нарича **формула на Нютон за интерполиране напред**.

Нека сега използваме горната формула, за да определим интерполационния полином за дадени равноотдалечени възли и стойности.

Задача 9. Определете стойността на $\sin 52^\circ$, като построите интерполационния полином за таблицата

α°	45	50	55	60
$\sin \alpha$	0.7071	0.7660	0.8192	0.8660

и използвате формулата на Нютон за интерполиране напред.

Решение. Търсим полинома във вида

$$L_3(f; x_0 + th) = \sum_{k=0}^3 \Delta^k f_0 \binom{t}{k} = \Delta^0 f_0 \binom{t}{0} + \Delta^1 f_0 \binom{t}{1} + \Delta^2 f_0 \binom{t}{2} + \Delta^3 f_0 \binom{t}{3}.$$

Да обърнем внимание, че полиномът се представя по степените на независимата променлива t чрез полиномите

$$\binom{t}{0} = 1, \quad \binom{t}{1} = t, \quad \binom{t}{2} = \frac{t(t-1)}{2!}, \quad \binom{t}{3} = \frac{t(t-1)(t-2)}{3!},$$

т.е. наистина търсеният полином е от степен 3.

Да построим таблицата с крайни разлики

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2	Ред 3
$x_0 = 45$	$\Delta^0 f_0 = 0.7071$			
$x_1 = 50$	$\Delta^0 f_1 = 0.7660$	$\Delta^1 f_0 = 0.7660 - 0.7071 = 0.0589$	$\Delta^2 f_0 = -0.0057$	$\Delta^3 f_0 = -0.0007$
$x_2 = 55$	$\Delta^0 f_2 = 0.8192$	$\Delta^1 f_1 = 0.8192 - 0.7660 = 0.0532$	$\Delta^2 f_1 = -0.0064$	
$x_3 = 60$	$\Delta^0 f_3 = 0.8660$	$\Delta^1 f_2 = 0.8660 - 0.8192 = 0.0468$		

Заместваме полученото в интерполационната формула:

$$L_3(f; x_0 + th) = 0.7071 + 0.0589t - 0.0057 \frac{t(t-1)}{2} - 0.0007 \frac{t(t-1)(t-2)}{6}.$$

Търсим стойността на полинома в точката $x = 52$. Нашата формула обаче е израз на независимата променлива t , която можем да определим като използваме връзката

$t = \frac{x - x_0}{h}$. Заместваме $x = 52, h = 5$ и $x_0 = 45$ във формулата за t и получаваме $t = \frac{7}{5}$. Следователно

$$L_3(f; 52) = \left(0.7071 + 0.0589t - 0.0057 \frac{(t-1)}{2} - 0.0007 \frac{t(t-1)(t-2)}{6} \right) \Big|_{t=\frac{7}{5}} = 0.788003.$$

□

По подобен начин може да се изведе и формулата за интерполиране назад (вж. лекции). Тя се извежда, като се използва формулата на Нютон, приложена за възлите $x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$ (взети в тази последователност), т.е.

$$L_n(f; x) = \sum_{k=0}^n f[x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-k}] (x - x_n) \dots (x - x_{n-k+1}).$$

След аналогична смяна $x = x_n + th$ се получава **формулата на Нютон за интерполиране назад**

$$L_n(f; x_n + th) = \sum_{k=0}^n \Delta^k f_{n-k} \binom{t+k-1}{k}.$$

За намирането на полинома по горната формула се използва същата таблица с крайни разлики, като коефициентите се намират на последния ред във всеки един от нейните стълбове.

Задача 10. Решете задача 9, като използвате формулата на Нютон за интерполиране назад.

Разбира се, всички разглеждани до момента формули намират един и същи полином, ако им зададем конкретни възли и стойности. Разликата между формулите за интерполиране напред и интерполиране назад обаче се вижда в следния случай. Нека са ни дадени например 50 равноотдалечени възела x_0, \dots, x_{49} и съответстващи стойности на дадена функция f в тези точки. Нека построим редица от интерполационни полиноми по формулата за интерполиране напред. Тогава полиномът от първа степен ще интерполира f в точките x_0, x_1 ; полиномът от втора степен – в точките x_0, x_1, x_2 и т.н. Ако използваме формулата за интерполиране назад, полиномът от първа степен ще използва възли x_n, x_{n-1} ; полиномът от втора – възлите x_n, x_{n-1}, x_{n-2} и т.н.

Ако искаме да пресметнем приближено стойността на f в дадена точка, често на практика се подхожда по следния начин. Построява се редица от интерполационни полиноми докато разликата на две съседни приближения стане достатъчно близка, т.е. по-малка от предварително зададен толеранс на грешката. Тогава можем да считаме, че сме намерили стойността с такава точност. Вземайки предвид казаното по-горе е ясно, че ако търсим стойността на f в точка близка до началото на интервала, за предпочитане е да използваме формулата с разлика напред и обратно, ако искаме да намерим стойността на f в точка близка до края на интервала – да използваме формулата с разлика назад.

Да отбележим отново, че формулите с крайни разлики имат следното предимство в сравнение с формулата с разделени разлики – за пресмятането на крайните разлики не се налага да се извършва деление, което е относително бавна и неточна операция в компютъра. Разбира се, недостатък е, че формулите са приложими само за равноотдалечени възли.

Задача 11. Нека f_0, f_1, \dots е произволна редица от числа, за които $\Delta^{n+1} f_i = 0$ за всяко $i = 0, 1, \dots$. Докажете, че съществува единствен алгебричен полином $q(x)$ от степен n , за който $q(i) = f_i, i = 0, 1, \dots, n, n+1, \dots$

Доказателство. Нека $q(x) \in \pi_n$ е полиномът, който удовлетворява интерполационните условия $q(i) = f_i, i = 0, n$. Вече знаем, че последният е единствен. Ще покажем, че той

удовлетворява и условията $q(i) = f_i, i > n$. За целта ще използваме принципа на математическата индукция. Нека допуснем, че $q(i) = f_i, i = 0, 1, \dots, m$ за $m \geq n$. Ще покажем, че твърдението е изпълнено и за $m + 1$, т.е. $q(m + 1) = f_{m+1}$. Имаме

- $q(0) = f_0, \dots, q(m) = f_m, m \geq n$,
- $\Delta^{n+1}f_i = 0, i = 0, 1, \dots$ (по условие),
- $\Delta^{n+1}q(i) = 0 (q \in \pi_n)$.

От последните две следва, че $\Delta^{n+1}f_i = \Delta^{n+1}q(i)$. От друга страна, аналитичната формула от задача 7 за крайната разлика от $n + 1$ -ви ред ни дава

$$\sum_{j=0}^{n+1} (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} f_{i+j} = \sum_{j=0}^{n+1} (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} q(i+j), \forall i.$$

Нека $i = m - n$. Тогава

$$\sum_{j=0}^{n+1} (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} f_{m-n+j} = \sum_{j=0}^{n+1} (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} q(m-n+j).$$

или, което е същото,

$$\sum_{j=0}^n (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} f_{m-n+j} + f_{m+1} = \sum_{j=0}^n (-1)^{n+1-j} \binom{n+1}{j} q(m-n+j) + q(m+1).$$

Сега използвайки факта, че $f_i = q(i), i = m - n, \dots, m$ следва, че $f_{m+1} = q(m+1)$. \square

Последната задача дава прост критерий да проверим дали дадени точки лежат върху права/парабола/крива от трета степен и т.н. Така например, ако крайните разлики от втори ред се нулират, то точките лежат върху права (коефициентите пред втората и по-високите степени в интерполационния полином ще бъдат нули).

Задача 12. Като се използват крайни разлики, да се намери сумата $1^2 + 2^2 + \dots + n^2$.

Решение. За да намерим сумата, ще използваме доказаното в предишната задача. Нека означим $S_i = 0^2 + 1^2 + 2^2 + \dots + i^2$. Разглеждаме редицата от числа S_0, S_1, \dots . Да пресметнем последователно крайните разлики

$$\begin{aligned} \Delta^1 S_i &= \Delta^0 S_{i+1} - \Delta^0 S_i = S_{i+1} - S_i = (i+1)^2, \\ \Delta^2 S_i &= \Delta^1 S_{i+1} - \Delta^1 S_i = (i+2)^2 - (i+1)^2 = 2i+3, \\ \Delta^3 S_i &= \Delta^2 S_{i+1} - \Delta^2 S_i = 2(i+1) + 3 - (2i+3) = 2, \\ \Delta^4 S_i &= \Delta^3 S_{i+1} - \Delta^3 S_i = 2 - 2 = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Получихме, че за редицата от числа S_0, S_1, \dots е изпълнено $\Delta^4 S_i = 0, i = 0, 1, 2, \dots$. Следователно съществува единствен полином $q \in \pi_3$, такъв че $q(i) = S_i, i = 0, 1, \dots$. Последния можем да определим с интерполационната формула на Нютон за интерполиране напред

$$\begin{aligned} q(t) &= \sum_{k=0}^3 \Delta^k q_0 \binom{t}{k} = \sum_{k=0}^3 \Delta^k S_0 \binom{t}{k} \\ &= \Delta^0 S_0 + \Delta^1 S_0 \frac{t}{1!} + \Delta^2 S_0 \frac{t(t-1)}{2!} + \Delta^3 S_0 \frac{t(t-1)(t-2)}{3!} \\ &= 0 + t + \frac{3}{2}t(t-1) + \frac{2}{6}t(t-1)(t-2) = \frac{t(t+1)(2t+1)}{6}. \end{aligned}$$

Следователно търсената сума е

$$0^2 + 1^2 + \dots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

\square

Задача 13. Като се използват крайни разлики, да се намери сумата $1^3 + 2^3 + \dots + n^3$.

Упражнение 6

Интерполационна задача на Ермит. Разделени разлики с кратни възли

Дотук разгледахме задачата на Лагранж, при която по дадена таблица от стойности намерихме алгебричен полином от π_n , чиято графика минава през съответните точки. В практиката често възникват задачи за приближаване на дадена функция f по зададени условия (информация за стойностите на функцията и нейните производни в дадени точки). Например интересен пример е полиномът на Тейлър, $T_n(x)$, който приближава (апроксимира) дадена функция, като използва една централна точка a , в която знаем стойността на функцията f и нейните производни:

$$T_n(x) = f(a) + f'(a)\frac{(x-a)}{1!} + f''(a)\frac{(x-a)^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(a)\frac{(x-a)^n}{n!}.$$

Да забележим, че $T_n(a) = f(a)$, $T'_n(a) = f'(a)$, \dots , $T_n^{(n)}(a) = f^{(n)}(a)$. Последното означава, че полиномът на Тейлър интерполира функцията заедно с производните ѝ до n -ти ред, включително, взети в точката a .

Бихме могли да си зададем следния въпрос. Можем ли за произволна таблица от $n+1$ стойности на функцията f и нейни производни от произволен ред да построим единствен полином от степен, ненадминаваща n ? Въпросът какви условия трябва да изпълнява таблицата от стойности, за да се определи единственият полином, който я интерполира, все още няма отговор. Съществуват, разбира се, частни случаи, за които единственост на решението е доказана. Най-важният в практиката случай (след задачата на Лагранж) е задачата на Ермит.

Постановка на интерполационната задача на Ермит. Нека са дадени $n+1$ различни точки x_0, \dots, x_n , съответни на тях цели положителни числа ν_0, \dots, ν_n (още се наричат кратности) и таблица от стойности на функцията f и нейните производни

$$\begin{aligned} x_0 : & f(x_0), f'(x_0), \dots, f^{(\nu_0-1)}(x_0), \\ x_1 : & f(x_1), f'(x_1), \dots, f^{(\nu_1-1)}(x_1), \\ & \vdots \\ x_n : & f(x_n), f'(x_n), \dots, f^{(\nu_n-1)}(x_n). \end{aligned}$$

Да се намери полином, който интерполира функцията f и съответните ѝ производни във възлите x_0, \dots, x_n . □

Последните задават общо $\nu_0 + \nu_1 + \dots + \nu_n$ интерполационни условия. Нека $N = \nu_0 + \nu_1 + \dots + \nu_n - 1$. Тогава задачата на Ермит може да се обобщи така – да се намери полиномът $H_N \in \pi_N$, който удовлетворява условията

$$H_N^{(\lambda)}(x_k) = f^{(\lambda)}(x_k), \quad k = 0, \dots, n, \quad \lambda = 0, \dots, \nu_k - 1.$$

Да отбележим, че интерполирането на производните позволява по-добре да се контролира поведението на полинома, например да има същата кривина като оригиналната функция и др.

Забележка: В учебника на Б.Боянов се използва означението $y_{k\lambda} = f^{(\lambda)}(x_k)$, т.е. търси се полином $P(x)$, който удовлетворява

$$P^{(\lambda)}(x_k) = y_{k\lambda}.$$

Интересно

Полиномът на Ермит се означава с $H_N(f; x)$ в чест на Чарлз Ермит (Charles Hermite). Ермит (1822-1901) има значителни открития в областта на комплексния анализ, в частност теория на уравненията. Един от неговите приноси в областта на математиката е, че през 1873 г. е доказал, че числото e е трансцендентно, т.е. че не е корен на нито едно алгебрично уравнение с цели коефициенти. Вследствие на това, през 1882 г. същото е доказано и за числото π .

Теорема 2. При всеки избор на интерполационните възли $\{x_k\}_0^n$ ($x_i \neq x_j$ при $i \neq j$) и при всяка таблица от стойности $y_{k\lambda}$ интерполационната задача на Ермит има единствено решение.

Нека сега се спрем на въпроса за построяването на решението на интерполационната задача. Както при тази на Лагранж, решението на задачата на Ермит може да бъде намерено по различни начини. Съществува аналогична формула на тази на Лагранж, както и обобщение на формулата на Нютон с разделени разлики, които ще разгледаме последователно.

Интерполационна формула във вид на Лагранж

Ще разгледаме формулата в един частен случай, при който $\nu_0 = \nu_1 = \dots = \nu_n = 2$. Да припомним задачата. Търсим полинома на Ермит от степен $2n + 1$ (за всеки възел имаме 2 условия – за стойността на функцията и първата ѝ производна, откъдето имаме общо $2(n + 1)$ условия), който интерполира функцията и нейната производна във всяка от точките x_0, \dots, x_n . За целта да означим:

- стойността на функцията f в т. x_k с y_k ;
- стойността на производната на f в т. x_k с y'_k ;

Теорема 3. Нека x_0, \dots, x_n са произволни различни точки от реалната права. Тогава при всеки избор на числата y_0, \dots, y_n и y'_0, \dots, y'_n полиномът

$$P(x) = \sum_{k=0}^n y_k \left\{ 1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right\} \left(\frac{\omega(x)}{(x - x_k)\omega'(x_k)} \right)^2 + \sum_{k=0}^n y'_k \left\{ \frac{\omega(x)}{(x - x_k)\omega'(x_k)} \right\}^2 (x - x_k)$$

е от степен, ненадминаваща $2n + 1$, и удовлетворява условията

$$P(x_k) = y_k, \quad P'(x_k) = y'_k, \quad k = 0, \dots, n.$$

Идея на доказателството. Аналогично на задачата на Лагранж, полиномът се търси във вида

$$P(x) = \sum_{k=0}^n (y_k H_{k0}(x) + y'_k H_{k1}(x)),$$

където $H_{k0}, H_{k1} \in \pi_{2n+1}$ са базисните полиноми, удовлетворяващи интерполационните условия:

$$\begin{aligned} H_{k0}(x_i) &= \delta_{ki}, & H'_{k0}(x_i) &= 0, \\ H_{k1}(x_i) &= 0, & H'_{k1}(x_i) &= \delta_{ki}, \end{aligned}$$

$k = 0, \dots, n, \quad i = 0, \dots, n$. Символът δ_{ki} е познатият ни символ на Кронекер

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq i, \\ 1, & \text{при } k = i. \end{cases}$$

С други думи, за всеки възел x_k отговарят два базисни полинома – H_{k0} за интерполационните условия за стойностите на функцията и H_{k1} за интерполационните условия за стойностите на производната ѝ. Аналитичният вид на базисните полиноми се намира от интерполационните условия, които изпълняват, като получаваме

$$H_{k0}(x) = \left\{ 1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right\} \underbrace{\left(\frac{\omega(x)}{(x - x_k)\omega'(x_k)} \right)^2}_{l_{kn}^2(x)} = \left\{ 1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right\} l_{kn}^2(x);$$

$$H_{k1}(x) = \left\{ \frac{\omega(x)}{(x - x_k)\omega'(x_k)} \right\}^2 (x - x_k) = l_{kn}^2(x_k)(x - x_k).$$

□

В общия случай извеждането на явния вид на полинома е доста трудоемко, затова няма да се спираме на него тук. Сега ще разгледаме една задача, тясно свързана с горната теорема.

Задача 14. Нека $l_{kn}(x)$, $k = \overline{0, n}$ са базисните полиноми на Лагранж, съответни на възлите x_0, \dots, x_n , и

$$\varphi_k(x) = \left(1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right) l_{kn}^2(x).$$

Докажете, че

$$\varphi'_k(x_k) = 0, k = \overline{0, n}.$$

Доказателство. Преди да докажем твърдението от условието на задачата, да обърнем внимание, че това е базисният полином $H_{k0}(x)$, който отговаря за интерполационните условия за стойностите на функцията. За него искаме да покажем, че производната му се нулира във всеки от възлите.

И така, имаме

$$\begin{aligned} \varphi'_k(x) &= \left(1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right)' l_{kn}^2(x) + \left(1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right) (l_{kn}^2(x))' \\ &= -\frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)} l_{kn}^2(x) + \left(1 - \frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)}(x - x_k) \right) (2l_{kn}(x)l'_{kn}(x)). \end{aligned}$$

Искаме да пресметнем $\varphi'_k(x_k)$. Полагаме $x = x_k$ в горната функция и заместваме $l_{kn}(x_k) = 1$. Имаме

$$\varphi'_k(x_k) = -\frac{\omega''(x_k)}{\omega'(x_k)} + 2l'_{kn}(x_k). \quad (6.1)$$

Остава да пресметнем производната на базисния полином на Лагранж в точката x_k . За тази цел ще използваме представянето му

$$l_{kn}(x) = \frac{\omega(x)}{(x - x_k)\omega'(x_k)}.$$

Да пресметнем производната на последното.

$$l'_{kn}(x) = \frac{1}{\omega'(x_k)} \left(\frac{\omega(x)}{x - x_k} \right)'$$

$$\Rightarrow l'_{kn}(x_k) = \frac{1}{\omega'(x_k)} \left(\frac{\omega(x)}{x - x_k} \right)' \Big|_{x=x_k} = \frac{1}{\omega'(x_k)} \left(\frac{\omega'(x)(x - x_k) - \omega(x) \cdot 1}{(x - x_k)^2} \right) \Big|_{x=x_k}$$

Формално горният израз не е дефиниран (ако заместим с $x = x_k$, ще получим частно $0/0$), той трябва да се интерпретира като граница при $x \rightarrow x_k$, т.е.

$$l'_{kn}(x_k) = \lim_{x \rightarrow x_k} l'_{kn}(x) = \lim_{x \rightarrow x_k} \left(\frac{\omega'(x)(x - x_k) - \omega(x)}{(x - x_k)^2} \right).$$

Имаме

$$\left(\frac{\omega'(x)(x - x_k) - \omega(x)}{(x - x_k)^2} \right) \Big|_{x=x_k} = \lim_{x \rightarrow x_k} \frac{\omega'(x)(x - x_k) - \omega(x)}{(x - x_k)^2}$$

$$\stackrel{L'H}{=} \lim_{x \rightarrow x_k} \frac{\omega''(x)(x - x_k) + \omega'(x) - \omega'(x)}{2(x - x_k)} = \frac{\omega''(x_k)}{2}.$$

От последното следва, че за базисния полином на Лагранж е в сила $l'_{kn}(x_k) = \frac{\omega''(x_k)}{2\omega'(x_k)}$.

Замествахме последното в (6.1) и получаваме търсеното равенство. \square

Интерполационна формула във вид на Нютон

Оказва се, че можем да използваме обобщение на формулата на Нютон и за намиране на полинома на Ермит. В предишното упражнение въведохме понятието разделена разлика, като приехме, че точките са различни. При задачата на Ермит във всяка точка можем да налагаме по няколко условия. Оттук нататък ще приемаме, че ако напишем възлите x_0, x_0, x_1, x_1, x_1 , то ще сме наложили условия за функцията и производната ѝ в x_0 (който е двукратен), функцията и първите две производни в x_1 (който е трикратен).

Искаме да обобщим понятието разделена разлика така, че да можем да го свържем с понятието производна. Нека дадем прост пример, като разгледаме производната от първи ред. Имаме

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} f[x, x_0] = f[x_0, x_0].$$

Ще постъпим аналогично, като разширим понятието разделена разлика по следния начин.

Определение 3. Нека f има непрекъснати производни до ред k включително в $[a, b]$. Разделена разлика от ред k за възлите $x_0 \leq \dots \leq x_n$ дефинираме рекурентно

$$f[x_0, \dots, x_k] = \begin{cases} \frac{f[x_1, \dots, x_k] - f[x_0, \dots, x_{k-1}]}{x_k - x_0}, & \text{ако } x_0 < x_k, \\ \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}, & \text{ако } x_0 = x_k. \end{cases}$$

Вече сме готови да се върнем на построяването на интерполационния полином. Нека са дадени възли $t_0 < \dots < t_n$ и техни кратности ν_0, \dots, ν_n , заедно със стойността на функцията и съответните ѝ производни във всеки от тях. Нека $N + 1$ е общият брой на интерполационни условия, т.е. $N = \nu_0 + \nu_1 + \dots + \nu_n - 1$. Нека още

$$(x_0, \dots, x_N) = (\underbrace{t_0, \dots, t_0}_{\nu_0}, \underbrace{t_1, \dots, t_1}_{\nu_1}, \dots, \underbrace{t_n, \dots, t_n}_{\nu_n}).$$

Да обърнем внимание, че от последното следва, че $x_0 \leq x_1 \leq \dots \leq x_N$.

Теорема 4. За полинома на Ермит е в сила формулата

$$H_N(f; x) = \sum_{k=0}^N f[x_0, \dots, x_k](x - x_0) \dots (x - x_{k-1}).$$

С други думи, ако искаме да определим полинома на Ермит, ще използваме познатата ни формула на Нютон, като единствената разлика е в това, че сме обобщили понятието разделена разлика. Оказва се, че, така обобщена, тя е точно коефициентът пред x^N в съответния полином на Ермит. Да построим такъв полином.

Задача 15. Като използвате интерполационната формула на Нютон с разделени разлики с кратни възли, намерете интерполационния полином на Ермит, който удовлетворява условията

$$p(0) = -1, \quad p'(0) = 1, \quad p''(0) = 2, \quad p(1) = 0, \quad p'(1) = -1.$$

Представете полинома по степените на x .

Решение. В условието на задачата са ни дадени пет интерполационни условия, следователно търсим полинома $H_4(f; x) \in \pi_4$ с явен вид

$$H_4(f; x) = f[0] + f[0, 0](x-0) + f[0, 0, 0](x-0)(x-0) + f[0, 0, 0, 1](x-0)^3 + f[0, 0, 0, 1, 1](x-0)^3(x-1).$$

И така, искаме да интерполираме таблицата

$x_0 = 0$	$x_1 = 0$	$x_2 = 0$	$x_3 = 1$	$x_4 = 1$
$f(0) = -1$	$f'(0) = 1$	$f''(0) = 2$	$f(1) = 0$	$f'(1) = -1$

Ще използваме познатата ни схема. За улеснение ще слагаме звезда на тези разделени разлики, които включват само кратни възли.

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2	Ред 3	Ред 4
$x_0 = 0$	$f[x_0] = -1$	$f[x_0, x_1]^* = 1$			
$x_1 = 0$	$f[x_1] = -1$	$f[x_1, x_2]^* = 1$	$f[x_0, x_1, x_2]^* = 1$		
$x_2 = 0$	$f[x_2] = -1$	$f[x_2, x_3] = 1$	$f[x_1, x_2, x_3] = 0$	$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = -1$	
$x_3 = 1$	$f[x_3] = 0$	$f[x_3, x_4]^* = -1$	$f[x_2, x_3, x_4] = -2$	$f[x_1, x_2, x_3, x_4] = -2$	$f[x_0, \dots, x_4] = -1$
$x_4 = 1$	$f[x_4] = 0$				

- Разделени разлики от първи ред:

$$\begin{aligned} f[x_0, x_1]^* &= \frac{f'(x_0)}{1!} = \frac{f'(0)}{1!} = \frac{1}{1!} = 1; & f[x_1, x_2]^* &= \frac{f'(x_1)}{1!} = \frac{f'(0)}{1!} = \frac{1}{1!} = 1; \\ f[x_2, x_3] &= \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2} = 1; & f[x_3, x_4]^* &= \frac{f'(x_3)}{1!} = \frac{f'(1)}{1!} = \frac{-1}{1!} = -1. \end{aligned}$$

- Разделени разлики от втори ред:

$$\begin{aligned} f[x_0, x_1, x_2]^* &= \frac{f''(x_0)}{2!} = \frac{f''(0)}{2!} = \frac{2}{2!} = 1; & f[x_1, x_2, x_3] &= \frac{f[x_2, x_3] - f[x_1, x_2]}{x_3 - x_1} = 0; \\ f[x_2, x_3, x_4] &= \frac{f[x_3, x_4] - f[x_2, x_3]}{x_4 - x_2} = \frac{-1 - 1}{1 - 0} = -2. \end{aligned}$$

- Разделени разлики от 3 и 4-ти ред:

$$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = \frac{f[x_1, x_2, x_3] - f[x_0, x_1, x_2]}{x_3 - x_0} = \frac{0 - 1}{1} = -1;$$

$$f[x_1, x_2, x_3, x_4] = \frac{f[x_2, x_3, x_4] - f[x_1, x_2, x_3]}{x_4 - x_1} = \frac{-2 - 0}{1} = -2;$$

$$f[x_0, x_1, x_2, x_3, x_4] = \frac{f[x_1, x_2, x_3, x_4] - f[x_0, x_1, x_2, x_3]}{x_4 - x_0} = \frac{-2 - (-1)}{1 - 0} = -1.$$

Заместваме получените разделени разлики във формулата за полинома:

$$H_4(f; x) = -1 + 1(x - 0) + 1(x - 0)^2 - 1(x - 0)^3 - 1(x - 0)^3(x - 1) \\ = -1 + x + x^2 - x^3 - x^4 + x^3 = -x^4 + x^2 + x - 1.$$

□

Забележка: Важно е да отбележим, че интерполационната задача на Ермит включва условия за функцията и производните ѝ, като те се взимат в последователен ред. Така например, ако сменим условието на горната задача на

$$p(0) = -1, \quad p''(0) = 2, \quad p(1) = 0, \quad p'(1) = -1,$$

то задачата вече не е интерполационна задача на Ермит, защото липсва условие за $p'(0)$. В общия случай не можем да твърдим съществуване и единственост на решението.

Задача 16. Намерете полинома, интерполиращ таблицата

0	0	0	1	2
-1	0	0	0	7

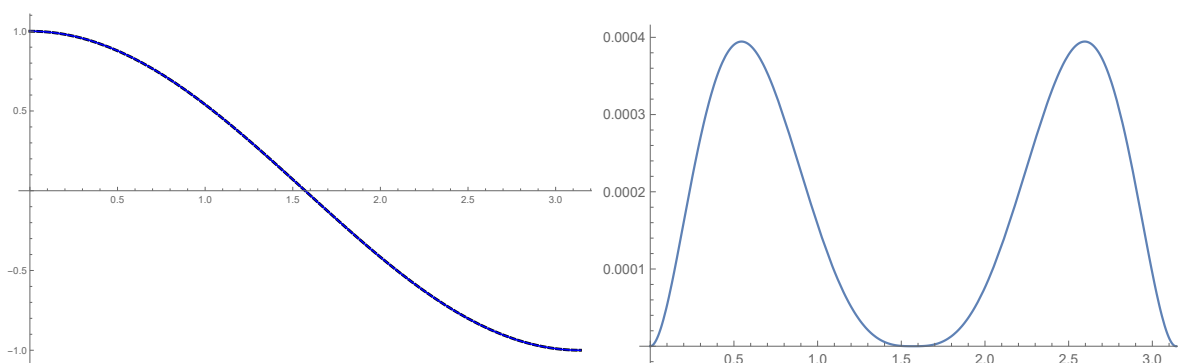
Оказва се, че за задачата на Ермит също може да се даде оценка на грешката, която правим при приближение $f(x) \approx H_N(f; x)$.

Теорема 5. Нека $a \leq x_0 < \dots < x_n \leq b$ са дадени възли, $\{\nu_k\}_0^N$ са произволни цели положителни числа (техни кратности) и функцията f има непрекъсната $(N + 1)$ -ва производна в $[a, b]$, където $N = \nu_0 + \nu_1 + \dots + \nu_n - 1$. Тогава за всяко $x \in [a, b]$, съществува число $\xi \in [a, b]$ такова, че

$$f(x) - H_N(f; x) = \frac{f^{(N+1)}(\xi)}{(N + 1)!} (x - x_0)^{\nu_0} \dots (x - x_n)^{\nu_n}.$$

Задача 17. Нека $f(x) = \cos x$ и $H_5(f; x)$ интерполира f в точките $0, \frac{\pi}{2}, \pi$ с кратност равна на 2. Дайте оценка на грешката.

Забележка: На фигурата вляво може да видите графиките на $f(x) = \cos x$ (с черен пунктир) и на полинома $H_5(f; x)$ (в синьо), построени в една координатна система, а вдясно – графиката на грешката $|f(x) - H_5(f; x)|$.



От графиката на грешката се вижда, че в действителност тя не надминава 0.0004. А вие каква оценка на грешката получихте?

Упражнение 7

Системи на Чебишов. Интерполиране с тригонометрични полиноми

7.1 Системи на Чебишов

Дотук разгледахме задачата за приближаване на функция с алгебричен полином, който я интерполира в краен брой точки, т.е. търсихме функция от вида

$$a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + \dots + a_n\varphi_n(x), \quad (7.1)$$

където $\varphi_i(x)$, $i = \overline{0, n}$ образуват базис на пространството π_n . Да обърнем внимание, че освен стандартния базис $1, x, x^2, \dots, x^n$, ние използвахме Лагранжевия базис $(l_0(x), \dots, l_n(x))$ и Нютоновия базис $(1, x - x_0, (x - x_0)(x - x_1), \dots, (x - x_0) \dots (x - x_{n-1}))$. Тези базиси ни помагат лесно да определим неизвестните коефициенти в полинома. Естествено е изборът на функцията, с която апроксимираме, да зависи от процеса, който искаме да опишем. Например, ако имаме експериментални данни за някакъв периодичен процес, бихме искали да моделираме процеса с периодична функция; растежът на микроорганизми често има експоненциален характер и т.н.

И така, ако искаме да определим възможно най-добро приближение на дадена функция (в нашия случай чрез интерполация), в зависимост от процеса може да се наложи да работим с други базиси в някое друго крайномерно линейно пространство. Такива например са:

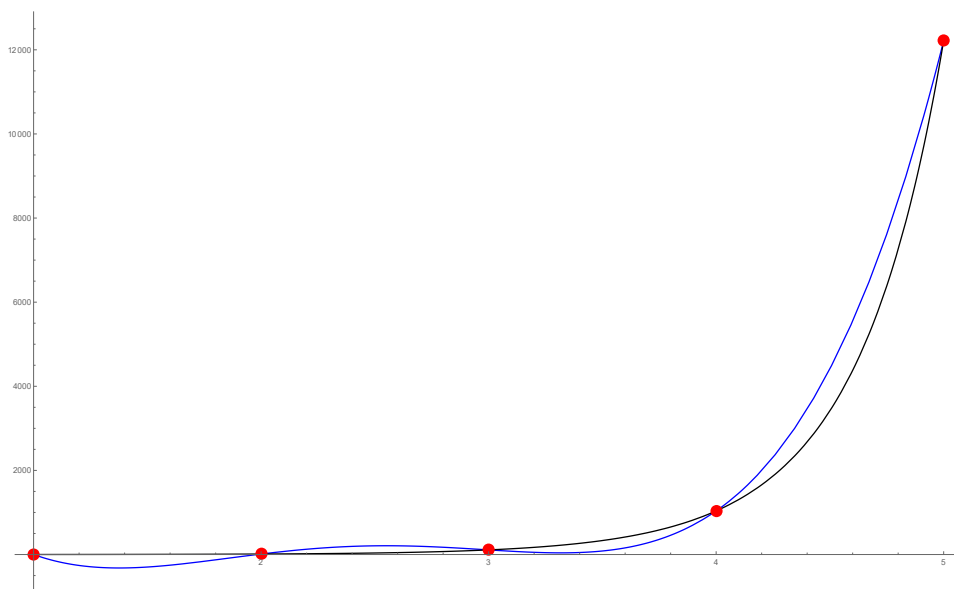
- Пространството от тригонометрични полиноми от ред n . Често използван базис на това пространство е

$$1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots, \cos nx, \sin nx;$$

- Пространството от експоненциални полиноми. Примерен негов базис е

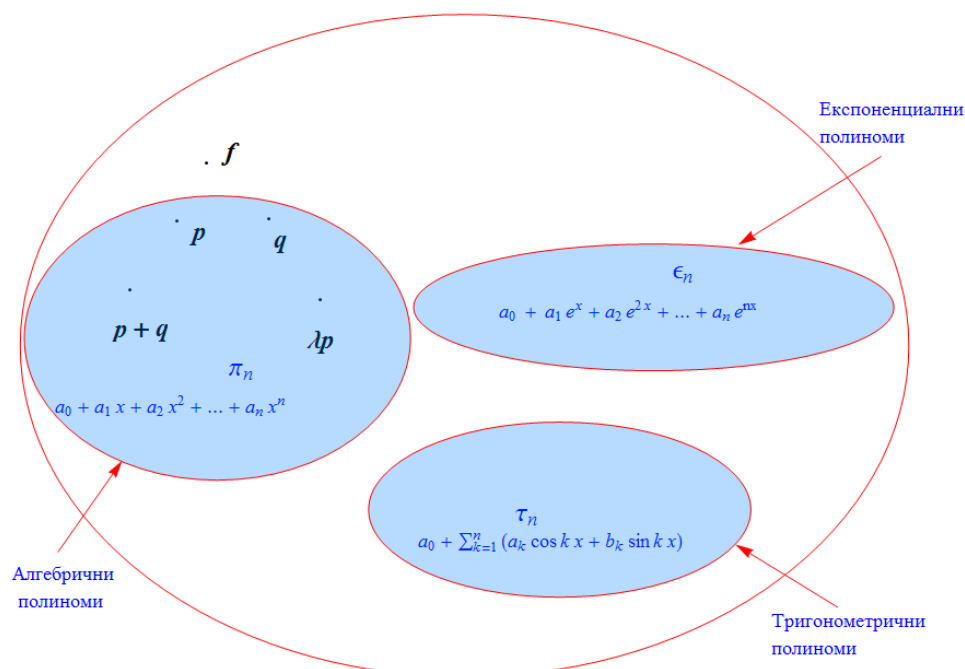
$$1, e^x, e^{2x}, \dots, e^{nx}.$$

Едно от значенията на това по какъв базис се избира полиномът, който интерполира дадени данни (или функция) е илюстрирано със следващата фигура. В червено са дадени измервания за развитието на бактериална популация (време/брой клетки $\times 1000$), в синьо е построенят съответно алгебричен полином, а в черно – полином по базиса $1, e^x, e^{2x}, e^{3x}, e^{4x}$.



От графиката можем да забележим, че в интервала $[1, 2]$ алгебричният полином има отрицателни стойности (което е недопустима стойност за брой клетки), докато експоненциалният полином е положителен за всяко x в интервала на интерполация.

Обикновено, когато искаме да намерим някакво приближение, го търсим в **крайномерно линейно пространство**. Причината за това е следната – всяко крайномерно пространство има краен брой базисни функции, а всяка функция от дадено линейно пространство може да се представи като линейна комбинация на базисните му функции. Така всяка функция от едно линейно крайномерно пространство може да се зададе като крайна линейна комбинация. С други думи, ако искаме да определим конкретна функция от крайномерно линейно пространство, то трябва да определим краен брой числа – нейните коефициенти в линейната комбинация.



Нека сега разгледаме задачата за намиране на интерполационен полином от произволно дадено крайномерно пространство.

Определение 4. Нека $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ са дадени линейно независими и непрекъснати функции в $[a, b]$. Линейната комбинация

$$\varphi(x) = a_0 \varphi_0(x) + \dots + a_n \varphi_n(x)$$

ще наричаме *обобщен полином по системата от функции* $\{\varphi_i(x)\}_{i=0}^n$.

Обща интерполационна задача. Нека в $[a, b]$ са дадени възли $x_0 < \dots < x_n$ и y_0, \dots, y_n са дадени стойности. Търсим обобщен полином $\varphi(x) = a_0\varphi_0(x) + \dots + a_n\varphi_n(x)$, който да удовлетворява интерполационните условия

$$\varphi(x_k) = y_k, \quad k = 0, \dots, n. \quad (7.2)$$

Последната задача може да се запише като линейна система по отношение на неизвестните коефициенти a_0, \dots, a_n :

$$\begin{pmatrix} \varphi_0(x_0) & \varphi_1(x_0) & \dots & \varphi_n(x_0) \\ \varphi_0(x_1) & \varphi_1(x_1) & \dots & \varphi_n(x_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_0(x_n) & \varphi_1(x_n) & \dots & \varphi_n(x_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

Следователно интерполационната задача (7.2) има единствено решение тогава и само тогава, когато детерминантата на матрицата на системата е различна от 0. Матрицата на системата ще бележим с $D[x_0, \dots, x_n]$. Оказва се, че единствеността на решението на общата интерполационна задача може да се покаже и по друг начин, като се използват така наречените *системи на Чебишов*.

Определение 5. Казваме, че функциите $\varphi_0(x), \dots, \varphi_n(x)$ образуват **система на Чебишов** (в литературата още се среща като *T-система*) **в интервала** I , ако всеки **ненулев** обобщен полином по тази система има най-много n различни нули в I .

Да припомним, че ненулев полином означава, че поне един от коефициентите в представянето му (7.1) е различен от 0. И така, в сила е следната теорема.

Теорема 6. Функциите $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ образуват система на Чебишов в интервала I тогава и само тогава, когато за **всеки избор** на точки $x_0 < \dots < x_n$ от I

$$\det D[x_0, \dots, x_n] \neq 0.$$

С други думи, последната теорема ни казва, че достатъчно условие общата интерполационна задача да има единствено решение е базисните функции на крайномерното пространство, в което търсим решение, да образуват система на Чебишов.

Пример 3. Най-простият пример за Чебишова система е алгебричната система, породена от функциите $\varphi_k(x) = x^k$. От основната теорема на алгебрата знаем, че всеки алгебричен полином

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$$

има най-много n различни нули, което означава, че системата е Чебишова.

Задача 18. Да се докаже, че $\{x^{2k+1}\}_{k=0}^n$ образуват Чебишова система в произволен интервал $[\alpha, \beta]$, $0 < \alpha < \beta$.

Доказателство. Нека

$$\varphi(x) = a_0x + a_1x^3 + \dots + a_nx^{2n+1}$$

е обобщен полином по тази система. Ще покажем, че той има не повече от n различни нули във всеки интервал $[\alpha, \beta]$, $0 < \alpha < \beta$, като го сведем чрез полагане до алгебрично уравнение от степен n . Да разгледаме уравнението

$$a_0x + a_1x^3 + \dots + a_nx^{2n+1} = 0.$$

Тъй като $x = 0$ не е в интервала $[\alpha, \beta]$, то можем да разделим на x двете страни на уравнението:

$$a_0 + a_1x^2 + \dots + a_nx^{2n} = 0. \quad (7.3)$$

Полагаме $y = x^2$, за да сведем горното уравнение до алгебрично уравнение от степен n :

$$a_0 + a_1 y + \dots + a_n y^n = 0.$$

От основната теорема на алгебрата знаем, че това уравнение има най-много n различни корена. Тъй като $x = \pm\sqrt{y}$ има най-много едно положително решение (ако $y > 0$), то на всяко y се съпоставя най-много едно положително число x , което да принадлежи на $[\alpha, \beta]$. Така (7.3) има най-много n различни корена в съответния интервал, т.е. системата е Чебишова в съответния интервал.

Забележка: Да обърнем внимание, че интервалът, в който изследваме системата функции е от съществено значение. В този случай използваме, че корените на уравнението трябва да са положителни. \square

Нека сега разгледаме пример за една Чебишова система, в която ясно се вижда значението на интервала I .

Задача 19. Да се докаже, че $\{1, \cos x\}$ образуват Чебишова система в интервала $[0, \pi]$, но не и в интервала $[0, 2\pi]$.

Доказателство. Ще докажем, че обобщеният полином

$$\varphi(x) = a_0 + a_1 \cos x$$

има най-много една нула в интервала $[0, \pi]$. Да отбележим, че условието $a_1 = 0$ влече $a_0 = 0$, което означава, че $\varphi(x)$ в този случай е нулевият полином. Следователно ние се интересуваме от случая, в който $a_1 \neq 0$. От $a_0 + a_1 \cos x = 0 \Rightarrow \cos x = -\frac{a_0}{a_1}$. Тъй като

в интервала $[0, \pi]$ е в сила $-1 \leq \cos x \leq 1$, то ако $-1 \leq -\frac{a_0}{a_1} \leq 1$ задачата ще има едно решение, а в противен случай – няма да има. С други думи, обобщеният полином по системата има най-много една нула, следователно системата е Чебишова.

Да разгледаме сега интервала $[0, 2\pi]$. Достатъчно е да покажем, че съществува полином, който има повече от 1 нула. Да разгледаме например полинома

$$\psi(x) = 0.1 + 1 \cdot \cos x = \cos x \quad (a_0 = 0, a_1 = 1).$$

Последният има два корена в интервала $[0, 2\pi]$: $\frac{\pi}{2}$ и $\frac{3\pi}{2}$, което означава, че системата не е Чебишова в този интервал. \square

Нека сега дадем пример за еквивалентността на това интерполационната задача с обобщен полином по дадена система от функции да има единствено решение за произволен избор на възлите и това системата да е Чебишова.

Пример 4. Да се намери обобщен полином по базиса $\{1, \cos x\}$, който интерполира таблицата

x	0	2π
$\varphi(x)$	0	1

Решение. Коефициентите в обобщения полином $\varphi(x) = a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot \cos x$ ще намерим, като решим системата уравнения, получена от интерполационните условия

$$\begin{cases} a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot 1 = 0 \\ a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot 1 = 1 \end{cases}$$

Очевидно горната система няма решение.

Забележка: Ако стойността в $x = 2\pi$ беше 0, задачата щеше да има безброй много решения. Както виждаме, тъй като системата не е Чебишова в интервала $[0, 2\pi]$, то не може да се гарантира единствеността на решението на интерполационната задача. \square

Да обърнем внимание, че една система може да не е Чебишова в даден интервал, но възлите могат да се изберат така, че въпреки това интерполационната задача да има единствено решение.

Задача 20. Нека функциите $\{\varphi_k(x)\}_0^n$ образуват система на Чебишов в $[a, b]$ и $\psi(x) > 0$ при $x \in [a, b]$. Да се докаже, че функциите $\{\psi(x)\varphi_k(x)\}_{k=0}^n$ също образуват система на Чебишов в $[a, b]$.

Доказателство. Да разгледаме системата от функции $\{\psi(x)\varphi_k(x)\}_0^n$. Произволен обобщен полином по последната система има вида

$$\Psi(x) = a_0\psi(x)\varphi_0(x) + \dots + a_n\psi(x)\varphi_n(x).$$

Изнасяме $\psi(x)$ пред скоби и получаваме

$$\Psi(x) = \psi(x) (a_0\varphi_0(x) + \dots + a_n\varphi_n(x)).$$

Тъй като $a_0\varphi_0(x), \dots, a_n\varphi_n(x)$ е обобщен полином по системата $\{\varphi_k(x)\}_{k=0}^n$, която е Чебишова, а $\psi(x) > 0$ по условие, то $\Psi(x)$ има толкова нули, колкото линейната комбинация $a_0\varphi_0(x), \dots, a_n\varphi_n(x)$, т.е. има най-много n различни нули. \square

Задача 21. Да се докаже, че функциите $\{\cos(kx)\}_0^n$ образуват система на Чебишов в интервала $[0, \pi]$.

Доказателство. Нека

$$\varphi(x) = a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot \cos x + a_2 \cdot \cos 2x + \dots + a_n \cdot \cos nx$$

е произволен ненулев обобщен полином по системата. Да допуснем, че полиномът има $n+1$ различни нули в интервала $[0, \pi]$. Ще покажем, че от допуснатото следва, че полиномът $\varphi(x)$ съвпада с нулевия полином, което е в противоречие с неговото построение.

Да направим смяна $x = \arccos t$ и да означим $\psi(t) = \varphi(\arccos t)$. Тъй като $x \in [0, \pi]$, то $t \in [-1, 1]$. Заместваме смяната в обобщения полином и получаваме

$$\begin{aligned} \psi(t) &= a_0 + a_1 \cos(\arccos t) + a_2 \cos(2 \arccos t) + \dots + a_n \cos(n \arccos t) \\ &= a_0 T_0(t) + a_1 T_1(t) + \dots + a_n T_n(t), \end{aligned}$$

където $T_k(x)$ е k -тият полином на Чебишов от I род. Тъй като $T_k(t) \in \pi_k$ (виж упражнението за полиноми на Чебишов), то $\psi(t) \in \pi_n$. От друга страна, допуснахме, че полиномът има $n+1$ различни нули, т.е. $\psi(t) \equiv 0$ и достигнахме до противоречие. Следователно полиномът има не повече от n различни нули. \square

Задача 22. Докажете, че $\{1, e^{2x}, e^{5x^2}\}$ образуват система на Чебишов в $(-\infty; +\infty)$.

Доказателство. За да бъде системата Чебишова, трябва всеки ненулев обобщен полином

$$f(x) = a_0 + a_1 e^{2x} + a_2 e^{5x^2}$$

да има най-много 2 различни нули в $(-\infty; +\infty)$. Да допуснем обратното. Нека обобщеният полином има три различни нули в $(-\infty; \infty)$. Аналогично на горната задача ще докажем, че $a_0 = a_1 = a_2 = 0$, т.е. $f(t) \equiv 0$ и достигаме до противоречие.

Тъй като $f(x)$ има 3 различни нули, то от теоремата на Рол следва, че $f'(x)$ трябва да има поне 2 различни нули. (Коментар: Теоремата на Рол ни казва, че ако е дадена непрекъсната функция в затворен интервал $[a, b]$, която е диференцируема в отворения интервал (a, b) и приема равни стойности в двата края на интервала, то $\exists \xi \in [a, b]$, за която $f'(\xi) = 0$. В нашия случай функцията f приема равни стойности в своите корени – там тя е нула, което означава, че между всеки два корена съществува поне една точка, в която производната се нулира.) Имаме

$$f'(x) = 2a_1 e^{2x} + 10a_2 x e^{5x^2} = 2e^{2x} (a_1 + 5a_2 x e^{5x^2-2x}).$$

Нека означим $g(x) := a_1 + 5a_2xe^{5x^2-2x}$. Тъй като $e^{2x} > 0, \forall x$, то нулите на $f'(x)$ съвпадат с нулите на $g(x)$. Така $g(x)$ има поне 2 различни нули в $(-\infty; +\infty)$. Отново по теоремата на Рол следва, че $g'(x)$ има поне една нула, т.е.

$$\underbrace{5a_2e^{5x^2-2x} + 5a_2xe^{5x^2-2x}(10x-2)}_{g'(x)} = 0$$

има поне 1 решение. Изнасяме общ множител от последното и получаваме

$$5a_2 \underbrace{e^{5x^2-2x}}_{\neq 0} \underbrace{(10x^2 - 2x + 1)}_{\neq 0} = 0.$$

Последното влече $a_2 = 0$. Така $f'(x) = 0 \iff a_2 = a_1 = 0$ и следователно $f(x) = 0 \iff a_2 = a_1 = a_0 = 0$. Достигнахме до противоречие, защото по условие $f(x)$ е ненулев обобщен полином. Следователно $f(x)$ има най-много 2 нули в $(-\infty; +\infty)$. \square

7.2 Интерполиране с тригонометрични полиноми

Нека сега се спрем на задачата за интерполиране с тригонометрични полиноми. На нея ще отделим специално внимание, предвид факта, че тригонометричните полиноми са периодични функции. Много често в практиката се налага работата с периодични данни и затова тригонометричните полиноми имат важно значение.

Определение 6. Израз от вида

$$t_n(x) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$$

наричаме тригонометричен полином от ред n .

Вече показахме, че системата от функции $\{\cos kx\}_0^n$ образува система на Чебишов в интервала $[0, \pi]$. Оказва се, че функциите, които участват в дефиницията за тригонометричен полином от ред n

$$1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots, \cos nx, \sin nx,$$

също образуват система на Чебишов – в интервала $[0, 2\pi)$. Това, разбира се, следва непосредствено от следващата лема (вж. лекции).

Лема 1. Всеки ненулев тригонометричен полином от ред n има не повече от $2n$ различни нули в $[0, 2\pi)$.

Като следствие на горната лема може да се покаже, че системата е Чебишова и във всеки от интервалите $[\alpha, \alpha + 2\pi)$, $\alpha \in \mathbb{R}$. От последното и от теоремата за единствеността на решението на обобщената интерполационна задача можем да формулираме следващата теорема.

Теорема 7. Нека $\alpha \leq x_0 < \dots < x_{2n} < \alpha + 2\pi$. Тогава за всяка функция f , определена в точките $\{x_i\}_{i=0}^{2n}$, съществува единствен тригонометричен полином от ред n такъв, че $t_n(x_i) = f(x_i)$, $i = \overline{0, 2n}$.

Както вече казахме, когато разглеждаме дадена задача, често е полезно да имаме няколко различни начина за намирането на решението ѝ – например за решаване на интерполационните задачи можем да подходим чрез решаване на система, намиране на аналитична формула и т.н.

Забележка: Преди да продължим, да обзрнем внимание, че тригонометричният полином от ред n има $2n + 1$ коефициента и следователно за него трябва да се наложат $2n + 1$ интерполационни условия.

Пример 5. Да се намери тригонометричният полином, интерполиращ таблицата

x	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/2$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$
y	0.1	0.807107	1.1	0.807107	0.1	-0.607107	-0.9

Решение. Нека първо обърнем внимание, че данните се съдържат в интервал с дължина 2π и следователно ще имаме единствено решение. Тъй като имаме седем интерполационни условия, то интерполационния полином ще търсим във вида

$$t(x) = a_0 + a_1 \cos x + a_2 \sin x + a_3 \cos 2x + a_4 \sin 2x + a_5 \cos 3x + a_6 \sin 3x.$$

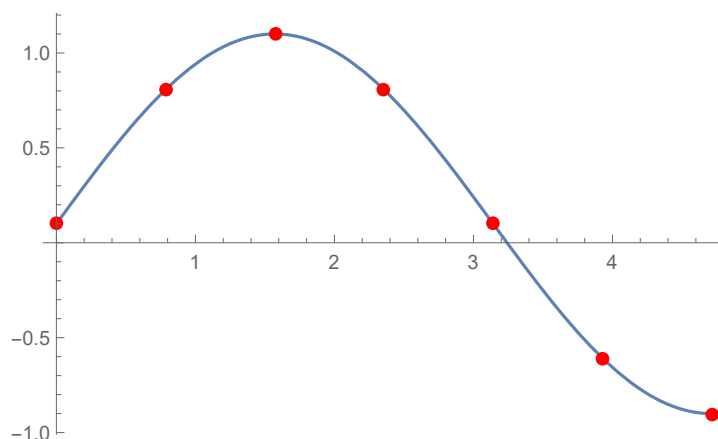
Последния можем да намерим, като решим системата, получена от интерполационните условия

$$t(x_0) = y_0, t(x_1) = y_1, \dots, t(x_6) = y_6.$$

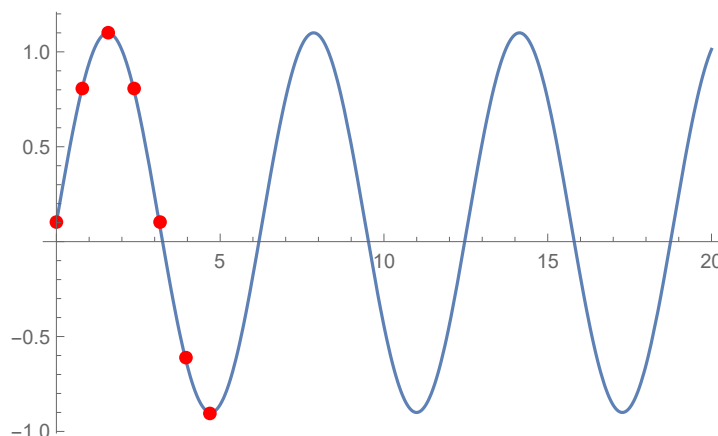
За решението ще използваме вградената функция *Solve* във *Wolfram Mathematica*:

```
t[x_] = a0 + a1 Cos[x] + a2 Sin[x] + a3 Cos[2 x] + a4 Sin[2 x] + a5 Cos[3 x] + a6 Sin[3 x];  
Solve[{t[0] == 0.1 && t[Pi/4] == 0.807107 && t[Pi/2] == 1.1 && t[3 Pi/4] == 0.807107 &&  
t[Pi] == 0.1 && t[5 Pi/4] == -0.607107 && t[3 Pi/2] == -0.9}, {a0, a1, a2, a3, a4, a5, a6}]
```

На следващата графика може да видим интерполационния полином с получените от решаването на системата коефициенти заедно с данните от таблицата:



Да обърнем внимание, че тригонометричният полином, който интерполира данните, е 2π -периодична функция:



□

Оказва се, че за задачата за интерполация с тригонометрични полиноми също съществува формула за намирането на интерполационния полином. Постъпвайки аналогично на

формулата на Лагранж, търсим полинома във вида

$$\tau_n(x) = \sum_{k=0}^{2n} f(x_k) \lambda_k(x),$$

където базисните функции са тригонометрични полиноми, които удовлетворяват условията $\lambda_k(x_i) = \delta_{ki}$. Такъв базис, който удовлетворява дадените условия, се нарича интерполяционен базис.

Теорема 8. Нека $\{x_k\}_{k=0}^{2n}$ са произволни точки, такива че $\alpha \leq x_0 < x_1 < \dots < x_{2n} < \alpha + 2\pi$ за някакво α и f е произволна функция, определена в тях. Тогава

$$\tau_n(x) = \sum_{k=0}^{2n} f(x_k) \prod_{i=0, i \neq k}^{2n} \frac{\sin \frac{x - x_i}{2}}{\sin \frac{x_k - x_i}{2}}$$

е единственият тригонометричен полином от ред n , който интерполира f в x_0, \dots, x_{2n} .

Както виждаме, е много удобно, ако можем да въведем интерполяционен базис в пространството, защото тогава можем да напишем проста формула за решението на интерполяционната задача, която е аналог на формулата на Лагранж.

Задача 23. Като използвате аналитичната формула, намерете решението на Пример 5.

$$\text{Отг. } \tau_3(x) = \sin x + 0.1$$

Както вече видяхме при интерполирането с алгебрични полиноми, съществуват особено удобни интерполяционни формули в случая на равноотдалечени възли. Оказва се, че такава може да се изведе и за тригонометричните полиноми. Нека са дадени $2n + 1$ равноотдалечени възела в интервала $[0, 2\pi)$, по-точно $x_k = \frac{2k\pi}{2n+1}$, $k = \overline{0, 2n}$.

В сила е следната формула:

$$\tau(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^n (A_k \cos kx + B_k \sin kx),$$

където

$$A_k = \frac{2}{2n+1} \sum_{i=0}^{2n} y_i \cos(kx_i), \quad k = \overline{0, n}, \quad B_k = \frac{2}{2n+1} \sum_{i=0}^{2n} y_i \sin(kx_i), \quad k = \overline{1, n}.$$

Задача 24. Като използвате формулата за тригонометрична интерполация при равноотдалечени възли, определете A_0, A_1, B_1 така, че $\tau(x) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos x + B_1 \sin x$ да удовлетворява условията

$$\tau(0) = 1, \quad \tau\left(\frac{2\pi}{3}\right) = 2, \quad \tau\left(\frac{4\pi}{3}\right) = 2.$$

Решение. Като при $n = 1$ заместим в горните формули $x_0 = 0, x_1 = 2\pi/3, x_2 = 4\pi/3$ и

$y_0 = 1, y_1 = y_2 = 2$, получаваме

$$A_0 = \frac{2}{3} \sum_{i=0}^2 y_i \cos(0x_i) = \frac{2}{3} (y_0 + y_1 + y_2) = \frac{2}{3} (1 + 2 + 2) = \frac{10}{3};$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{2}{3} \sum_{i=0}^2 y_i \cos x_i = \frac{2}{3} \left(1 \cos 0 + 2 \cos \frac{2\pi}{3} + 2 \cos \frac{4\pi}{3} \right) \\ &= \frac{2}{3} \left(1 + 2 \left(-\frac{1}{2} \right) + 2 \left(-\frac{1}{2} \right) \right) = -\frac{2}{3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{2}{3} \sum_{i=0}^2 y_i \sin x_i = \frac{2}{3} \left(1 \sin 0 + 2 \sin \frac{2\pi}{3} + 2 \sin \frac{4\pi}{3} \right) \\ &= \frac{2}{3} \left(0 + 2 \frac{\sqrt{3}}{2} + 2 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = 0. \end{aligned}$$

Следователно търсеният тригонометричен полином е $\tau(x) = \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cos x$. □

Упражнение 8

Сплайн функции. Интерполиране с кубични сплайни

8.1 Сплайн функции

Вече показахме, че има и други класове от функции, освен алгебричните полиноми, които може да се използват за описване на дадени процеси – тригонометрични, експоненциални полиноми и др. В това упражнение ще се спрем на още един клас функции (т.нар. сплайн-функции или сплайни), който играе основна роля при различни практически задачи на изчислителната математика – интерполиране, числено диференциране, интегриране и др. Сплайните играят ключова роля например и в компютърната графика.

Както знаем, интерполирането с алгебрични полиноми може да има някои сериозни недостатъци. Такива например са:

- Полиномите от висока степен имат свойството да осцилират. Обикновено грешката при тях в някои интервали може да бъде много голяма (особено в краищата на интервала на интерполация);
- Високите степени на полинома могат да доведат до по-големи грешки от закръгляване;
- Колкото по-висока степен има даден полином, толкова повече коефициенти в представянето му трябва да се определят;
- Теоремата за оценка на грешката в общия случай не дава „сходимост“ на решението. Това означава, че няма как да сме сигурни, че резултатът, който получаваме, ще бъде най-добър от гледна точка на достигане на минимална грешка;
- Всеки алгебричен полином е безкрайно диференцируем. Такава гладкост на решението обикновено не е необходима.

И така, за точността на интерполиране основно значение имат дължината на интервала на интерполация и степента на полинома. С други думи, бихме искали дължината на интервала да е достатъчно малка, а степента на полинома – достатъчно ниска. В такъв случай бихме могли да направим следното – да разделим интервала $[a, b]$ на подинтервали $[x_i, x_{i+1}]$, $i = 0, m$, където $x_0 = a$ и $x_{m+1} = b$, и във всеки подинтервал да намерим полином $p_i(x)$ от някоя ниска степен, който да интерполира данните в този интервал (или функцията). С други думи, ще търсим решението на интерполационната задача като **по части полиномиална крива**. Обикновено тази полиномиална крива трябва да описва гладък процес, затова ще налагаме допълнителни условия за гладкост, т.е. всяка от кривите в подинтервалите да се свързва гладко с полиномиалните криви от съседните интервали. Разбира се, това става, като наложим условия за нейните производни.

Определение 7. Ще казваме, че $s(x)$ е сплайн-функция (или сплайн) от степен r с възли $t_1 < \dots < t_n$ (англ. **knots**, за разлика от **nodes**, който се използва за възли при интерполация), ако удовлетворява следните условия:

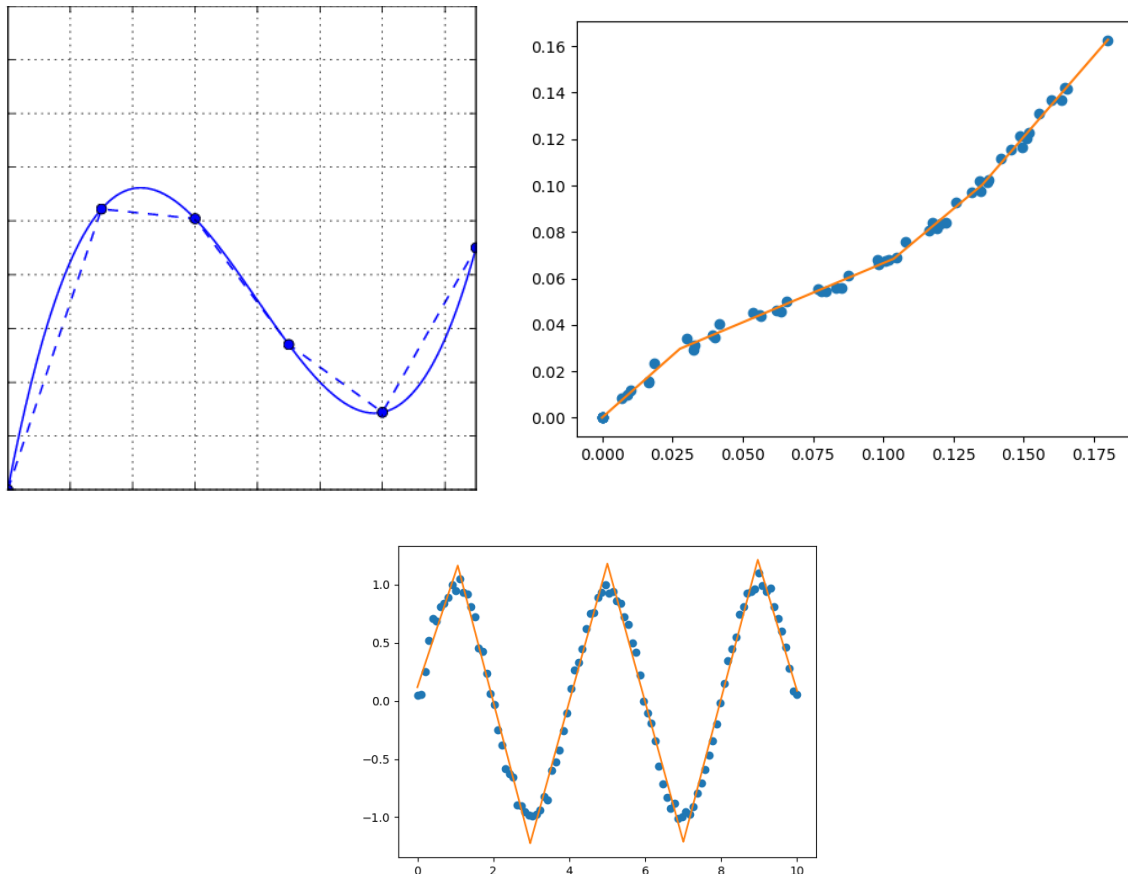
1. $s(x)$ е полином от степен най-много r (т.е. е от π_r) във всеки подинтервал (t_i, t_{i+1}) , $i = \overline{0, n}$, където $t_0 = -\infty, t_{n+1} = +\infty$;
2. $s(x), s'(x), \dots, s^{(r-1)}(x)$ са непрекъснати функции в $(-\infty, +\infty)$, т.е. за $i = \overline{1, n}$

$$\begin{aligned} p_{i-1}(t_i) &= p_i(t_i), \\ p'_{i-1}(t_i) &= p'_i(t_i), \\ &\vdots \\ p_{i-1}^{(r-1)}(t_i) &= p_i^{(r-1)}(t_i). \end{aligned}$$

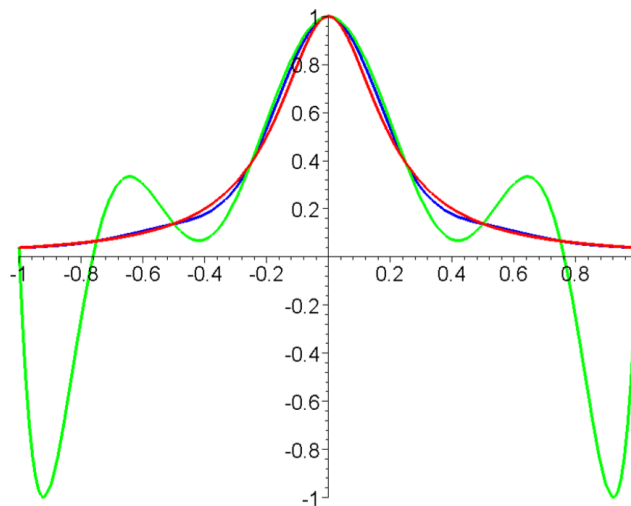
Множеството от сплайн-функции от степен r с възли $t_1 < \dots < t_n$ ще бележим с $S_r(t_1, \dots, t_n)$.

Нека сега обясним по-подробно горната дефиниция. Сплайн от степен r е по части полиномиална функция, която във всеки интервал съвпада с полином от степен, ненадминаваща r . Нещо повече, всеки сплайн трябва да удовлетворява условие за гладкост във всеки един от възлите си, т.е. полиномите от два съседни интервала трябва да се свързват гладко в съответния възел, т.е. да имат равни стойности в него, както и равни производни.

На фигурите по-долу са дадени примери за сплайни от първа степен (чиито графики са начупени непрекъснати линии) и сплайн от трета степен (който, предвид наложените условия за производната, изглежда като „гладка“ крива).



Фигура 8.1: Сплайн от първа степен

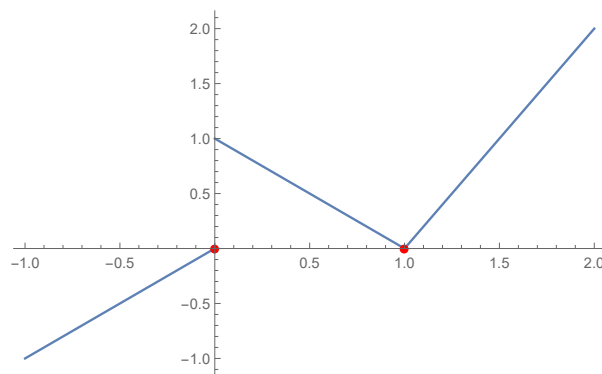


Фигура 8.2: Функцията на Рунге (в червено), интерполирана с полином от осма степен (в зелено) и сплайн от трета степен/кубичен сплайн (в синьо). Използвани са равноотдалечени възли в $[-1, 1]$ със стъпка 0.25.

От фигурите се вижда голямото предимство на сплайните – те са много гъвкави функции, които могат да описват много сложно поведение на дадени данни. От друга страна, във всеки подинтервал те са полиноми, което ги прави много лесни за работа.

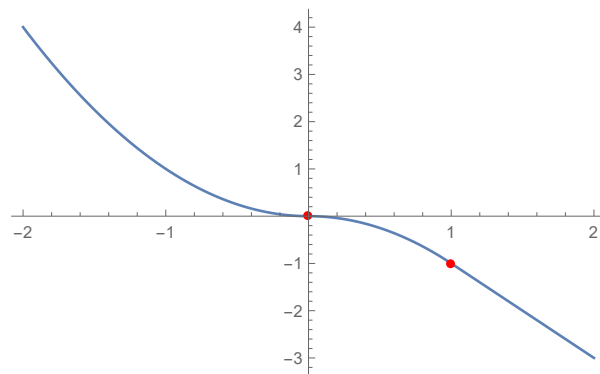
Задача 25. Определете дали функцията е сплайн от първа степен:

$$s(x) = \begin{cases} x, & x \in [-1, 0], \\ 1 - x, & x \in (0, 1), \\ 2x - 2, & x \in [1, 2] \end{cases}$$



Задача 26. Определете дали функцията е сплайн от втора степен:

$$s(x) = \begin{cases} x^2, & x \in [-2, 0], \\ -x^2, & x \in (0, 1), \\ 1 - 2x, & x \geq 1 \end{cases}$$



Нека разгледаме някои следствия от дефиницията на сплайн:

- производната на сплайн от степен r е сплайн от степен $r - 1$;
- r -тата производна на сплайн $s(x) \in S_r(t_1, \dots, t_n)$ е по части константа с евентуални точки на прекъсване във възлите на сплайна;
- r -тата примитивна функция на една функция, която е по части константа, е сплайн от степен r .

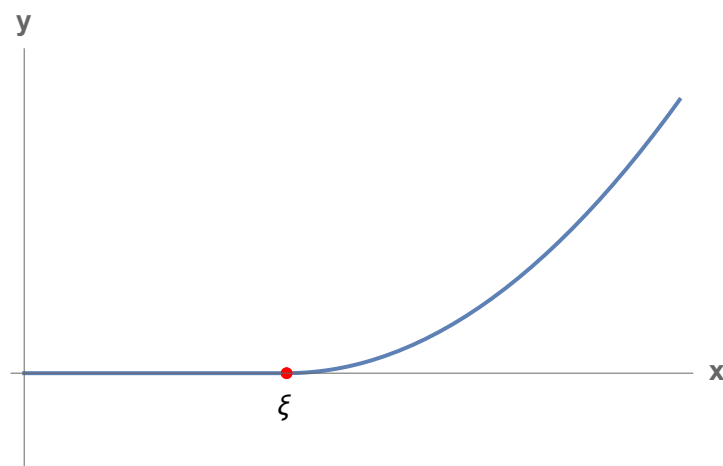
Разбира се, след като дадохме дефиниция на сплайн, естествено е да си зададем въпроса съществува ли базис, по който може да представим всеки сплайн от даден клас. Преди това да разгледаме един частен случай за сплайн от степен r с един възел.

Определение 8. Функцията

$$(x - \xi)_+^r = \begin{cases} (x - \xi)^r, & x \geq \xi \\ 0, & x < \xi, \end{cases}$$

ще наричаме **отсечена степенна функция**.

Последната очевидно изпълнява условията за сплайн от степен r с възел ξ – във всеки от двата интервала тя е от π_r и левите и десните ѝ производни до ред $r - 1$ в точката ξ съвпадат (равни са на 0):



Оказва се, че отсечената степенна функция играе основна роля в теорията на сплайн-функциите. Следващата теорема показва, че всеки сплайн се представя като сума на алгебричен полином от π_r и линейна комбинация на подходящи отсечени степенни функции.

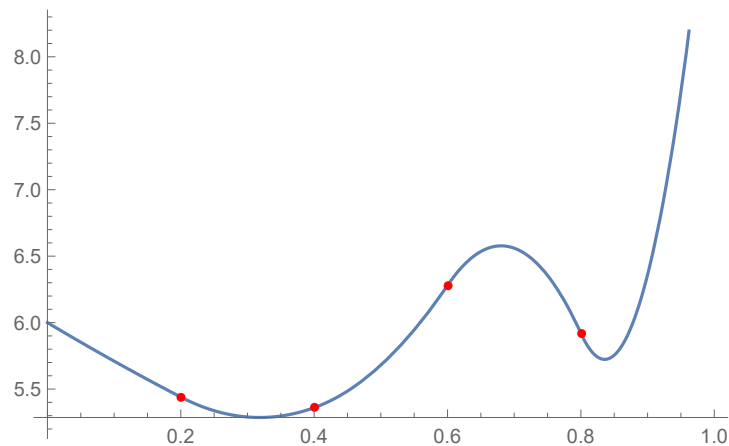
Теорема 9. Всяка сплайн-функция $s(x)$ от класа $S_r(t_1, \dots, t_n)$ се представя по единствен начин във вида

$$s(x) = p(x) + \sum_{k=1}^n c_k (x - t_k)_+^r,$$

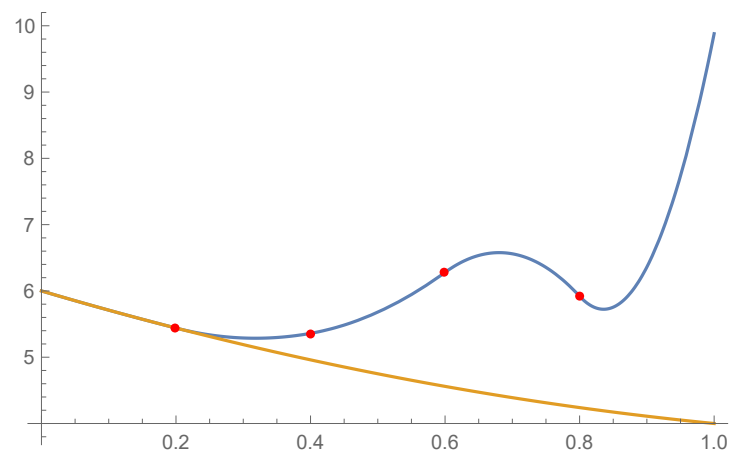
където $p(x) \in \pi_r$, а c_1, \dots, c_n са реални числа. Нещо повече,

$$c_k = \frac{s^{(r)}(t_k + 0) - s^{(r)}(t_k - 0)}{r!}, \quad k = 1, \dots, n.$$

Нека сега обясним представянето на сплайна като линейна комбинация на отсечени степенни функции и полином от π_r . Ясно е, че за да определим сплайна, то трябва във всеки интервал да определим алгебричния полином, който съвпада с него. Нека разгледаме следната примерна фигура на сплайн от втора степен (квадратичен сплайн) с 4 възела t_1, t_2, t_3, t_4 и нека го означим с $s(x)$:



В първия интервал е ясно, че $s(x)$ съвпада с някакъв (очевидно единствен) полином $p(x) \in \pi_2$, както е показано на следната фигура:

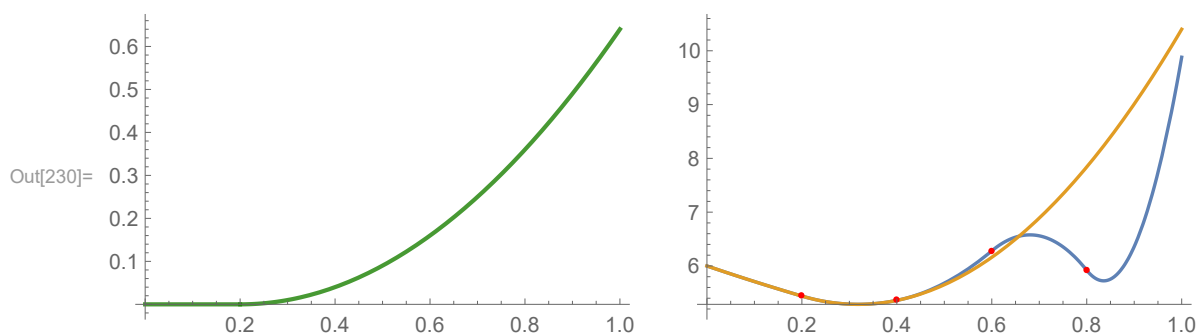


Искаме към полинома да прибавим някаква функция $s_1(x)$ така, че във втория интервал (t_1 до t_2) графиката на получената функция $p(x) + s_1(x)$ също да съвпада с графиката на сплайна. Следователно трябва да прибавим функцията $s_1(x)$, която:

- не променя нищо в първия интервал;
- е полином от π_2 във втория;
- стойността ѝ в t_1 е 0;

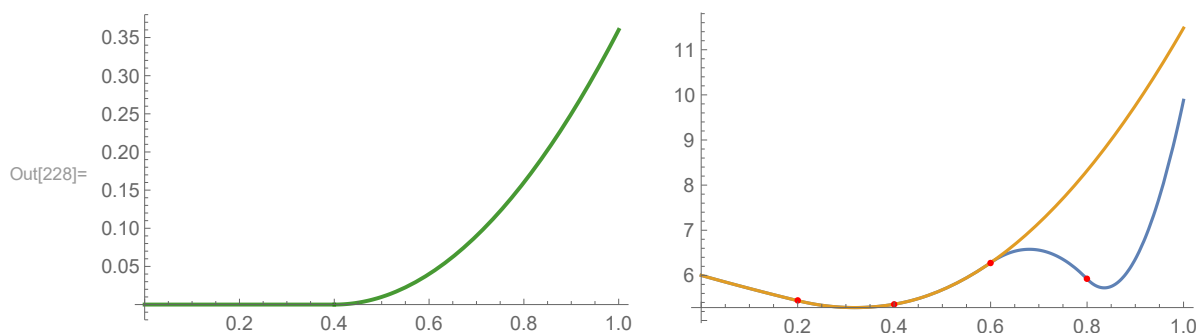
- стойността на първата ѝ производна в t_1 също е 0 (това ще гарантира непрекъснатостта на производната).

Такова условие удовлетворява точно отсечената степенна функция $s_1(x) = (x - t_1)_+^2$, евентуално умножена по константа. Графиките на $s_1(x)$ и $p(x) + c_1 s_1(x)$ са показани по-долу.



Фигура 8.3: Графика на $s_1(x)$ (вляво) и $p(x) + c_1 s_1(x)$ заедно с $s(x)$ (вдясно).

Ще постъпим аналогично и за третия интервал. Към функцията $p(x) + c_1 s_1(x)$ прибавяме константа по отсечената степенна функция $s_2(x) = (x - t_2)_+^2$. Така не променяме нищо в първите два интервала спрямо предходната фигура, а целим да получим „правилния“ полином в третия интервал.



Фигура 8.4: Графика на $s_2(x)$ (вляво) и $p(x) + c_1 s_1(x) + c_2 s_2(x)$ заедно с $s(x)$ (вдясно).

За да получим сплайна, продължаваме аналогично за всеки следващ интервал.

От последната теорема следва, че всеки сплайн от степен r с възли t_1, \dots, t_n има вида

$$s(x) = \underbrace{a_0 + a_1 x + \dots + a_r x^r}_{p(x)} + c_1 (x - t_1)_+^r + c_2 (x - t_2)_+^r + \dots + c_n (x - t_n)_+^r,$$

т.е. може да се разглежда като обобщен полином по базиса $1, x, \dots, x^r, (x - t_1)_+^r, \dots, (x - t_n)_+^r$.

С други думи, множеството $S_r(t_1, \dots, t_n)$ е **крайномерно линейно пространство с размерност $n + r + 1$** .

8.2 Интерполиране с кубични сплайни

Нека сега разгледаме задачата за интерполиране със сплайни. За да определим еднозначно $s(x)$ трябва да определим коефициентите в представянето му, които са $n + r + 1$ на брой. С други думи, ако искаме да определим сплайн, който интерполира дадени точки, трябва

да му зададем общо $n + r + 1$ условия (да отбележим, че това не означава, че тези условия може да са произволни). В това упражнение ще се спрем на въпроса за интерполиране с кубични сплайни, тъй като те са може би най-често използваните на практика сплайни за интерполация, заради тяхната гладкост. Да припомним, че за да бъде една по части полиномиална функция кубичен сплайн с възли t_1, \dots, t_n , тя трябва да изпълнява следните условия:

- да бъде полином от степен, ненадминаваща три, във всеки подинтервал, определен от възлите на сплайна;
- $s(x), s'(x), s''(x)$ трябва да бъдат непрекъснати функции в интервала $(-\infty, +\infty)$.

Постановка на задачата Нека е дадена функцията $f(x)$, непрекъсната в $[a, b]$, и интерполационни възли $a = x_0 < \dots < x_{n+1} = b$. Да се намери кубичен сплайн $s(x)$ с възли x_1, \dots, x_n , който да интерполира f във всеки от възлите.

С други думи, за възли на сплайна ще вземем тези интерполационни възли, които по естествен начин разделят интервала $[a, b]$, т.е. x_1, \dots, x_n .

Вече казахме, че за да построим $s(x)$, трябва да определим полиномите $p_i(x)$ във всеки подинтервал $(x_i, x_{i+1}), i = \overline{0, n}$. Да отбележим, че за определянето на полинома $p_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3$ трябва да определим четирите коефициента в представянето му, т.е. да наложим за него четири условия. От интерполационните условия следва, че

$$s(x_i) = f(x_i), i = \overline{0, n+1}.$$

Последното влече условията за непрекъснатост

$$p_i(x_i) = f(x_i), p_i(x_{i+1}) = f(x_{i+1}), i = \overline{0, n},$$

еквивалентни на условията $p_{i-1}(x_i) = p_i(x_i), i = \overline{2, n}$. Така за всяка функция $p_i(x)$ налагаме 2 интерполационни условия, т.е. трябва да зададем още 2. Различните методи за интерполиране с по части кубични функции се определят от това как сме избрали тези две условия.

- условия за първа производна

Можем да поискаме полиномите $p_i(x)$ да удовлетворяват условията

$$p'_i(x_i) = k_i, p'_i(x_{i+1}) = k_{i+1}.$$

Последните условия гарантират непрекъснатост на първата производна на $s(x)$. За различен избор на числата $\{k_i\}$ получаваме различни интерполиращи функции. Например, ако изберем

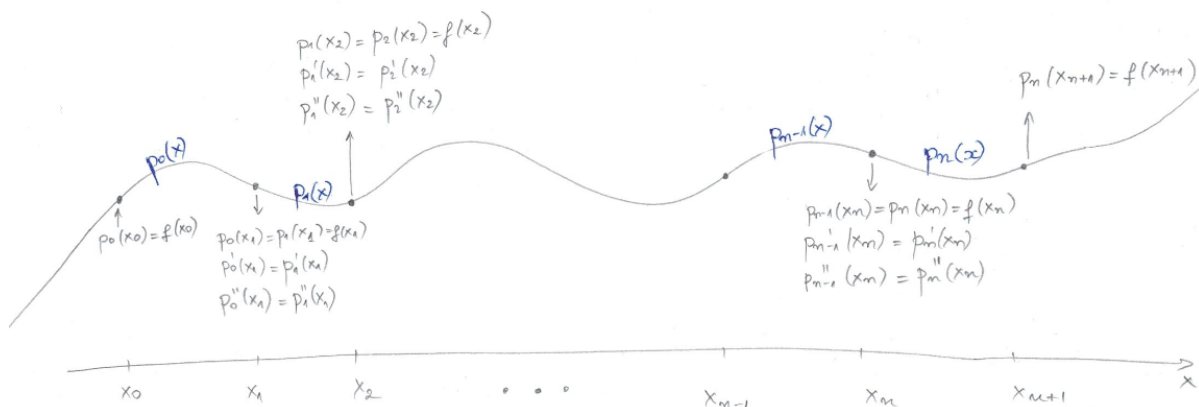
$$p'_i(x_i) = f'(x_i), p'_i(x_{i+1}) = f'(x_{i+1}),$$

получаваме известната по части Ермитова интерполация – в този случай за полиномите $p_i(x)$ се налагат интерполационни условия за първата производна на функцията. Така получената функция се използва често на практика, но не е задължително кубичен сплайн, тъй като няма необходимата гладкост (има само непрекъсната първа производна).

- условия за втора производна

Нека поискаме по части полиномиалната функция да бъде непрекъсната, с непрекъснати първи и втори производни, т.е. да бъде кубичен сплайн. Оказва се, че такъв винаги съществува, като се определя еднозначно от „граничните“ условия за производните $s'(a), s''(a), s'(b), s''(b)$ ($a := x_0, b := x_{n+1}$).

За да разберем последното, да припомним, че искаме да определим полиномите $p_0(x), p_1(x), \dots, p_n(x)$, като за всеки от тях трябва да зададем по 4 условия, т.е. общо $4(n+1)$. Да разгледаме следната скица:



На скицата съответства следната система уравнения:

условие	общ брой условия
(1) $p_i(x_i) = y_i$ $i = 0, \dots, n$	$n + 1$
(2) $p_i(x_{i+1}) = y_{i+1}$ $i = 0, \dots, n$	$n + 1$
(3) $p'_{i-1}(x_i) = p'_i(x_i)$ $i = 1, \dots, n$	n
(4) $p''_{i-1}(x_i) = p''_i(x_i)$ $i = 1, \dots, n$	n

Последната система има $4(n + 1)$ неизвестни и $4n + 2$ условия. За да има единствено решение, трябва да зададем още две условия – в граничните точки $a = x_0$ и $b = x_{n+1}$. Следните две допълнителни условия най-често се добавят към горната система:

(i) Ако $f'(a)$ и $f'(b)$ се знаят, то естествено е да се вземат условията:

$$s'(a) = p'_0(a) = f'(a), \quad s'(b) = p_n(b) = f'(b).$$

С така зададени условия се получава така наречена **пълна сплайнова кубична интерполация**;

(ii) Добавят се условия

$$s''(a) = p''_0(a) = 0, \quad s''(b) = p''_n(b) = 0.$$

С тези условия получаваме така наречената **естествена кубична сплайнова интерполация**.

Нека сега разгледаме един конкретен пример за определяне на кубичен сплайн.

Задача 27. Да се намери сплайнът $s(x) \in S_3(0)$, интерполиращ $f(x) = x^4$ при пълна кубична сплайнова интерполация в точките $x_0 = -1$, $x_1 = 0$, $x_2 = 1$.

Решение. Търсим сплайн от степен $r = 3$ с възел $t_1 = 0$ във вида

$$s(x) = \begin{cases} p_0(x) \in \pi_3, & x \leq 0, \\ p_1(x) \in \pi_3, & x \geq 0, \end{cases}$$

За да бъде кубичната сплайнова интерполация пълна, то трябва да зададем условия за първите производни в двата края. Имаме системата:

$$\begin{aligned} p_0(x_0) &= f(x_0), & p'_0(x_0) &= f'(x_0) & (\text{леви гранични условия}), \\ p_0(x_1) &= p_1(x_1) = f(x_1), & p'_0(x_1) &= p'_1(x_1), & p''_0(x_1) &= p''_1(x_1) & (\text{усл. за непрекъснатост в } t_0), \\ p_1(x_2) &= f(x_2), & p'_1(x_2) &= f'(x_2) & (\text{десни гранични условия}). \end{aligned}$$

Искаме да определим $p_0(x) = a_0 + b_0x + c_0x^2 + d_0x^3$ и $p_1(x) = a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3$. Можем да решим задачата по няколко начина. Първият начин е да си разпишем производните на полиномите и да определим коефициентите във всеки един от тях, като решим получената система. Ние ще разгледаме друг подход, който използва наученото от предишните упражнения.

Да заместим интерполационните условия от условието на задачата. Имаме:

$$\begin{aligned} p_0(-1) &= 1, \quad p'_0(-1) = -4, \\ p_0(0) &= p_1(0) = 0, \\ p'_0(0) &= p'_1(0) = d, \quad (\text{полагаме първата производна да е неизвестен параметър } d) \\ p''_0(0) &= p''_1(0), \\ p_1(1) &= 1, \quad p'_1(1) = 4. \end{aligned}$$

Ще определим $p_0(x)$ и $p_1(x)$, като решим две интерполационни задачи на Ермит. Неизвестния параметър d ще намерим от условието $p''_0(0) = p''_1(0)$. Имаме интерполационните таблици

$$p_0(x) : \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline -1 & -1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & -4 & 0 & d \\ \hline \end{array} \quad p_1(x) : \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline 0 & d & 1 & 4 \\ \hline \end{array}$$

Ще използваме познатата ни схема за определяне на полиномите $p_0(x)$ и $p_1(x)$.

- Определяне на $p_0(x)$

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2	Ред 3
$x_0 = -1$	$f(x_0) = 1$	$f[x_0, x_1]^* = -4$	$f[x_0, x_1, x_2] = 3$ $f[x_1, x_2, x_3] = d + 1$	$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = d - 2$
$x_1 = -1$	$f(x_1) = 1$			
$x_2 = 0$	$f(x_2) = 0$	$f[x_1, x_2] = -1$		
$x_3 = 0$	$f(x_3) = 0$	$f[x_2, x_3]^* = d$		

От формулата на Нютон за интерполационния полином на Ермит получаваме

$$p_0(x) = 1 - 4(x + 1) + 3(x + 1)^2 + (d - 2)x(x + 1)^2 \Rightarrow p''_0(0) = 4d - 2.$$

- Определяне на $p_1(x)$

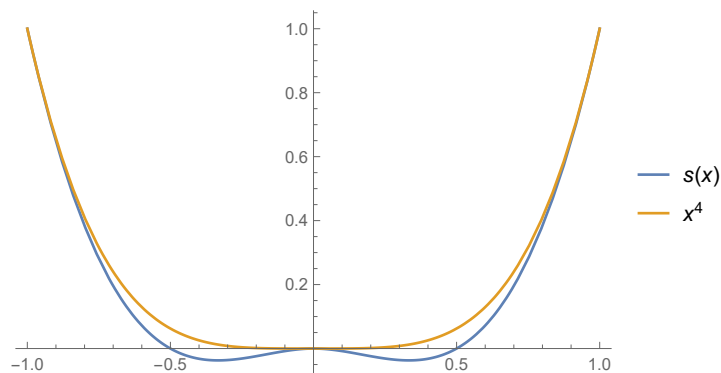
Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2	Ред 3
$x_0 = 0$	$f(x_0) = 0$	$f[x_0, x_1]^* = d$	$f[x_0, x_1, x_2] = 1 - d$ $f[x_1, x_2, x_3] = 3$	$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = 2 + d$
$x_1 = 0$	$f(x_1) = 0$			
$x_2 = 1$	$f(x_2) = 1$	$f[x_1, x_2] = 1$		
$x_3 = 1$	$f(x_3) = 1$	$f[x_2, x_3]^* = 4$		

От формулата на Нютон за интерполационния полином на Ермит получаваме

$$p_1(x) = 0 + dx + (1 - d)x^2 + (2 + d)x^2(x - 1) \Rightarrow p''_1(0) = -4d - 2.$$

От условието за непрекъснатостта в $t = 0$ имаме $4d - 2 = 4d - 2 \Rightarrow d = 0$. Следователно търсеният сплайн е

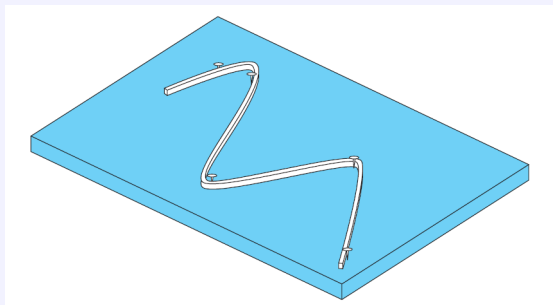
$$s(x) = \begin{cases} -2x^3 - x^2, & x \leq 0, \\ 2x^3 - x^2, & x \geq 0. \end{cases}$$



□

Интересно

Понятието сплайн идва от корабостроенето в стари времена. Там се използвал дълъг тънък и плосък инструмент, наречен сплайн, който се фиксирал в дадени точки чрез болтове и изглеждал точно като естествен кубичен сплайн. При огъването му е известен физически факт, че добива такава форма, при която енергията от деформациите е минимална. Тази техника се използва и в наши дни при проектирането на кораби.



Упражнение 9

В-сплайни

В миналото упражнение показахме, че всеки сплайн $s(t)$ от степен $r-1$ с възли $x_1 < \dots < x_n$ може да се представи като линейна комбинация на функциите

$$1, t, \dots, t^{r-1}, (t-x_1)_+^{r-1}, \dots, (t-x_n)_+^{r-1}$$

или очевидно

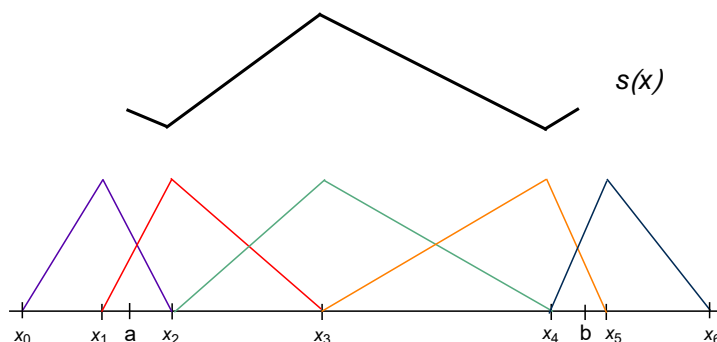
$$1, t, \dots, t^{r-1}, (x_1-t)_+^{r-1}, \dots, (x_n-t)_+^{r-1}.$$

С други думи, ако искаме да определим сплайна в интервала (x_i, x_{i+1}) (т.е. полинома $p_i(x) \in \pi_{r-1}$, с който той съвпада в него), можем да го намерим като линейна комбинация на функциите

$$1, t, \dots, t^{r-1}, (t-x_1)_+^{r-1}, \dots, (t-x_i)_+^{r-1}.$$

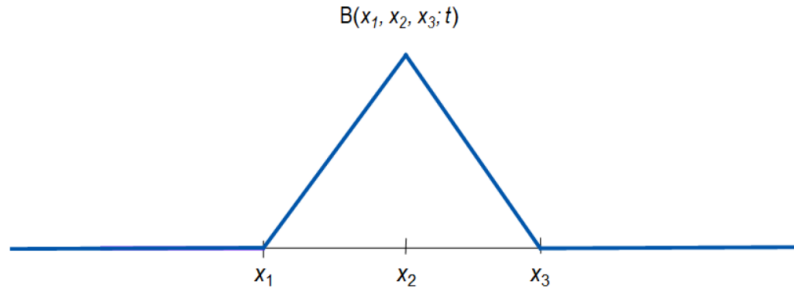
В такъв случай ще искаме да определим полином от степен $r-1$ като използваме $i+r$ израза. Това, разбира се, не е целесъобразно поради няколко причини. Първо, естествено е да искаме да намерим $p_i(x) \in \pi_{r-1}$ като линейна комбинация на r базисни функции, а не $i+r$. Второ, повече базисни функции в представянето му би могло да е причина за възникване на грешки от закръгляване.

Нека потърсим друг базис, по който можем да представим сплайните, така че да избегнем този недостатък. Нека е даден интервал $[a, b]$, в който искаме да определим линеен сплайн $s(x)$ с възли x_2, x_3, x_4 . На долната фигура са дадени примерен сплайн $s(x)$ заедно с базиса, който искаме да намерим:



Във всеки интервал $[a, x_2]$, $[x_2, x_3]$, $[x_3, x_4]$, ще искаме да определим по два базисни линейни сплайна, по които може да се представи полиномът, с който съвпада $s(x)$.

Нека разгледаме една от тези базисни функции. Например базисната функция, която отговаря за възела x_2 , е илюстрирана по-долу.



Тя, разбира се, е сплайн от първа степен с възли x_1, x_2, x_3 . Следователно може да се изрази като $p(x) + c_1(x_1 - t)_+ + c_2(x_2 - t)_+ + c_3(x_3 - t)_+$. Да припомним, че

$$(\xi - t)_+^r = \begin{cases} (\xi - t)^r, & t \leq \xi, \\ 0, & t > \xi. \end{cases}$$

Нека се опитаме да определим $p(x)$ и коефициентите c_1, c_2 и c_3 в представянето му. Лесно се вижда, че $p(x) \equiv 0$. С други думи, базисният сплайн (или накратко B -сплайн) е линейна комбинация на стойностите на функцията $f(x) = (x - t)_+$ в точките x_1, x_2, x_3 . Тази линейна комбинация трябва:

- да бъде непрекъсната;
- да бъде тъждествено 0 за $t \in (-\infty; x_1)$.

Да обърнем внимание, че за $t \in (-\infty, x_1)$ всъщност това е линейната комбинация на стойностите на $(x - t)$ в точките x_1, x_2, x_3 и тя трябва да е тъждествено нула. Тази линейна комбинация е именно разделената разлика на функцията в дадените възли.

Определение 9. Разделената разлика на отсечената степенна функция $(x - t)_+^{r-1}$ по отношение на x в точките x_0, \dots, x_r се нарича B -сплайн (Basis spline) от степен $r - 1$ с възли x_0, \dots, x_r . Последната ще означаваме с:

$$B(x_0, \dots, x_r; t) = (x - t)_+^{r-1}[x_0, \dots, x_r].$$

Да припомним, че изведохме аналитична формула за разделената разлика, която за функцията $f(x) = (x - t)_+^{r-1}$ изглежда така:

$$B(x_0, \dots, x_r; t) = (x - t)_+^{r-1}[x_0, \dots, x_r] = \sum_{k=0}^r \frac{(x_k - t)_+^{r-1}}{\omega'(x_k)}.$$

Теорема 10. За B -сплайна от степен $r - 1$ с възли x_0, \dots, x_r е в сила:

- $B(x_0, \dots, x_r; t) = 0$ за всяко $t \leq x_0$ и всяко $t \geq x_r$;
- $B(x_0, \dots, x_r; t) > 0$ при $t \in (x_0, x_r)$,

за всяко $r \geq 1$.

Забележка: Интервалът, в който една функция е различна от нула, се нарича носител. Следователно B -сплайнът $B(x_0, \dots, x_r; t)$ има краен носител (x_0, x_r) .

Задача 28. Да се пресметне $B(0, 1, 3; t)$.

Решение. Имаме $B(0, 1, 3; t) = (x-t)_+^1[0, 1, 3]$. От дефиницията за сплайн и горната теорема следва, че търсим базисния сплайн във вида:

$$B(0, 1, 3; t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ p_1(t), & 0 \leq t \leq 1, \\ p_2(t), & 1 \leq t \leq 3, \\ 0, & t \geq 3. \end{cases}$$

Трябва да определим полинома за $t \in [0, 1]$ и $[1, 3]$. За целта ще използваме дефиницията за B -сплайн. Да припомним, че

$$(x-t)_+^r = \begin{cases} (x-t)^r, & x \geq t, \\ 0, & x \leq t. \end{cases}$$

- $t \in [0, 1]$

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2
$x_0 = 0$	$(0 - t)_+ = 0$	$1 - t$	$\frac{t}{3}$
$x_1 = 1$	$(1 - t)_+ = 1 - t$	1	
$x_2 = 3$	$(3 - t)_+ = 3 - t$		

- $t \in [1, 3]$

Възли	Ред 0	Ред 1	Ред 2
$x_0 = 0$	$(0 - t)_+ = 0$	0	$\frac{3 - t}{6}$
$x_1 = 1$	$(1 - t)_+ = 0$	$\frac{3 - t}{2}$	
$x_2 = 3$	$(3 - t)_+ = 3 - t$		

Получихме

$$B(0, 1, 3; t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ t/3, & 0 \leq t \leq 1, \\ (3-t)/6, & 1 \leq t \leq 3, \\ 0, & t \geq 3. \end{cases}$$

□

Вече показахме как изглежда един B -сплайн. Нека сега разгледаме въпроса за намиране на базис от B -сплайни в дадено пространство от сплайни. Оттук нататък ще бележим $B_{i,r-1}(t) := B(x_i, \dots, x_{i+r}; t), \forall i$.

Задача 29. Да се докаже, че функциите $B_{i,1} = B(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}; t), i = 1, \dots, n$, са базис в пространството $S_1(x_3, \dots, x_n)$ в интервала $[a, b]$, където $x_1 < x_2 = a < x_3 < \dots < x_n < x_{n+1} = b < x_{n+2}$.

Решение. Искаме да покажем, че B -сплайните

$$B(x_1, x_2, x_3; t), B(x_2, x_3, x_4; t), \dots, B(x_n, x_{n+1}, x_{n+2}; t)$$

образуват базис в $[a, b]$, т.е. са линейно независими в интервала $[a, b]$. Да допуснем противното. Нека

$$f(t) = \alpha_1 B_{1,1}(t) + \alpha_2 B_{2,1}(t) + \cdots + \alpha_n B_{n,1}(t) = 0$$

за някое $\alpha_k \neq 0, \forall t \in [a, b]$. Но $B_{k,1}(x_2)=0, k = \overline{2, n} \Rightarrow f(x_2) = f(a) = \alpha_1 \underbrace{B_{1,1}(a)}_{\neq 0} = 0$.

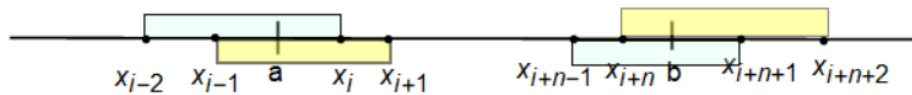
Последното влече $\alpha_1 = 0$. Постъпваме аналогично и за възлите x_3, \dots, x_{n+1} , откъдето $\alpha_2 = \cdots = \alpha_n = 0$ и достигаем до противоречие. Следователно $B_{i,1}(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}), i = \overline{1, n}$, образуват базис на пространството $S_1(x_3, \dots, x_n)$. \square

Последната задача е частен случай на общата теорема за произволно пространство от сплайн-функции, доказана на лекции.

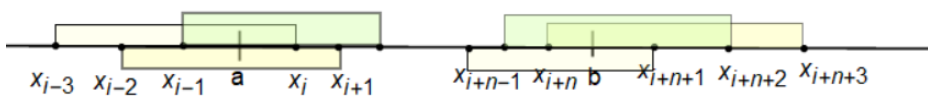
Теорема 11. Нека са дадени възли $x_1 < \cdots < x_r \leq a, a < x_{r+1} < \cdots < x_n < b$ и $b \leq x_{n+1} < \cdots < x_{n+r}$. Тогава B -сплайните $B(x_1, \dots, x_{r+1}; t), \dots, B(x_n, \dots, x_{n+r}; t)$ образуват базис в пространството $S_{r-1}(x_{r+1}, \dots, x_n)$.

За да разберем по-добре горната теорема, нека разгледаме следните фигури.

- Нека x_i е първият възел в интервала $[a, b]$. За сплайните от първа степен в интервала $[a, x_i]$ трябва да има два B -сплайна, които да са различни от 0, за да определят съответния полином от първа степен. Това са $B(x_{i-2}, x_{i-1}, x_i; t)$ и $B(x_{i-1}, x_i, x_{i+1}; t)$, чиито носители са заштриховани съответно със синьо и жълто на долната фигура. Затова вземаме два възела преди a . Аналогично трябва да вземем два възела след b .



- За квадратичните сплайни в интервала $[a, x_i]$ трябва да има три B -сплайна, които са различни от 0 в него и определят съответния полином от втора степен. Техните носители са заштриховани на долната фигура. Следователно трябва да вземем три възела преди a и аналогично три след b .



Изобщо казано, за да определим сплайни от $(r-1)$ -ва степен в интервала $[a, b]$, трябва да вземем редица от B -сплайни, отговаряща на възли, които започват r възела преди a и завършват r възела след b .

Задача 30. Покажете, че $\int_{x_0}^{x_r} B(x_0, \dots, x_r; t) dt = \frac{1}{r}$.

Доказателство. За да докажем твърдението, ще използваме дефиницията за B -сплайн и

твърдението за носителя на отсечената степенна функция. Заместваме:

$$\begin{aligned}
\int_{x_0}^{x_r} B(x_0, \dots, x_r; t) dt &= \int_{x_0}^{x_r} (x-t)_+^{r-1} [x_0, \dots, x_r] dt = \int_{x_0}^{x_r} \sum_{k=0}^r c_k (x_k - t)_+^{r-1} dt \\
&= \sum_{k=0}^r c_k \int_{x_0}^{x_r} (x_k - t)_+^{r-1} dt = \sum_{k=0}^r c_k \left(\int_{x_0}^{x_k} (x_k - t)_+^{r-1} dt + \int_{x_k}^{x_r} (x_k - t)_+^{r-1} dt \right) \\
&= \sum_{k=0}^r c_k \int_{x_0}^{x_k} (x_k - t)_+^{r-1} dt = - \sum_{k=0}^r c_k \frac{(x_k - t)^r}{r} \Big|_{x_0}^{x_k} = \sum_{k=0}^r c_k \frac{(x_k - x_0)^r}{r} \\
&= \frac{1}{r} \sum_{k=0}^r c_k (x_k - x_0)^r = \frac{1}{r} (x - x_0)^r [x_0, \dots, x_r] = \frac{1}{r}.
\end{aligned}$$

□

Оказва се, че за B -сплайните съществува и удобна рекурентна връзка, с която да бъдат пресметнати.

Теорема 12. За всяко $r \geq 2$ и $t \in (-\infty, \infty)$ е в сила равенството

$$B_{i,r-1}(t) = \frac{t - x_i}{x_{i+r} - x_i} B_{i,r-2}(t) + \frac{x_{i+r} - t}{x_{i+r} - x_i} B_{i+1,r-2}(t),$$

където

$$B_{i,0}(t) = \begin{cases} \frac{1}{x_{i+1} - x_i}, & t \in [x_i, x_{i+1}), \\ 0, & t \notin [x_i, x_{i+1}). \end{cases}$$

Забележка: Да обърнем внимание, че така дефинирано $B_{i,0}$ е по части константа.

Задача 31. Като използвате рекурентната връзка, изведете явния вид на $B(0, 1, 2, 3; t)$.

Решение. Ще използваме рекурентната връзка, за да получим B -сплайна от втора степен с възли 0, 1, 2 и 3:

$$B(0, 1, 2, 3; t) = \frac{t - 0}{3 - 0} B(0, 1, 2; t) + \frac{3 - t}{3 - 0} B(1, 2, 3; t).$$

С помощта на рекурентната връзка сведохме задачата до задача за определяне на съответните B -сплайни от първа степен (т.е. с една степен по-малко). Аналогично:

$$\begin{aligned}
B(0, 1, 2; t) &= \frac{t - 0}{2 - 0} B(0, 1; t) + \frac{2 - t}{2 - 0} B(1, 2; t); \\
B(1, 2, 3; t) &= \frac{t - 1}{3 - 1} B(1, 2; t) + \frac{3 - t}{3 - 1} B(2, 3; t).
\end{aligned}$$

Тъй като $B(0, 1; t)$, $B(1, 2; t)$, $B(2, 3; t)$ имат различен носител, то ще разгледаме поотделно всеки един от интервалите, определен от възлите.

- $t \in [0, 1]$

$$B(0, 1; t) = \frac{1}{1 - 0} = 1, \quad B(1, 2; t) = 0, \quad B(2, 3; t) = 0.$$

- $t \in [1, 2]$

$$B(0, 1; t) = 0, \quad B(1, 2; t) = \frac{1}{2 - 1} = 1, \quad B(2, 3; t) = 0.$$

- $t \in [2, 3]$

$$B(0, 1; t) = 0, \quad B(1, 2; t) = 0, \quad B(2, 3; t) = \frac{1}{3 - 2} = 1.$$

Заместваме последните последователно в рекурентната връзка и получаваме:

$$B(0, 1, 2, 3; t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{t}{3} \cdot \frac{t}{2} + \frac{3-t}{3} \cdot 0 = \frac{t^2}{6}, & t \in [0, 1], \\ \frac{t}{3} \cdot \frac{2-t}{2} + \frac{3-t}{3} \cdot \frac{t-1}{2} = \frac{-2t^2 + 6t - 3}{6}, & t \in [1, 2] \\ \frac{t}{3} \cdot 0 + \frac{3-t}{3} \cdot \frac{3-t}{3-1} = \frac{t^2 - 6t + 9}{6}, & t \in [2, 3], \\ 0, & t \geq 3. \end{cases}$$

□

Упражнение 10

Приближение в линейни нормирани пространства. Равномерно приближение на непрекъснати функции с алгебрични полиноми

10.1 Приближение в линейни нормирани пространства

Досега разгледахме задачата за намиране на функция от някакво линейно крайномерно пространство, която интерполира друга функция в дадени точки. В следващите няколко упражнения ще разгледаме друг критерий за това колко „близки” са две функции една до друга.

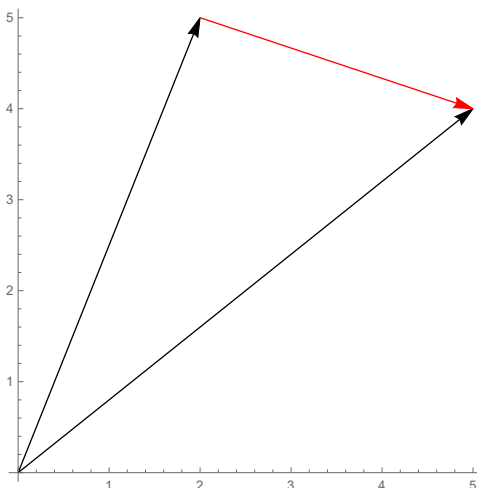
Нека разгледаме две точки в равнината. Разбира се, това колко близко са те една до друга се определя от разстоянието между тях. Ще обобщим понятието разстояние така, че то да бъде приложимо за произволни обекти (от дадено линейно пространство). За тази цел ще искаме да се запазят основните свойства на разстоянието между две точки.

Определение 10. Нека F е дадено линейно пространство. Казваме, че в F е въведено **разстояние**, ако на всеки два елемента $f, g \in F$ съпоставяме число $\rho(f, g)$, което удовлетворява следните изисквания:

1. $\rho(f, g) \geq 0$, като равенство се достига $\Leftrightarrow f \equiv g$;
2. $\rho(f, g) = \rho(g, f)$;
3. $\rho(f, g) \leq \rho(f, h) + \rho(h, g)$, $\forall f, g, h \in F$.

Линейно пространство, в което е въведено разстояние (метрика), ще наричаме линейно метрично пространство.

За да намерим разстоянието между две точки в равнината например, трябва да намерим дължината (големината) на отсечката, която ги свързва. Както знаем, на всяка точка се съпоставя радиус-вектор. Тогава търсената дължина е равна на големината на разликата между двата вектора:



Следователно, ако можем да мерим големината на даден вектор, то можем да измерваме и разстоянието между две точки (или два вектора, два елемента и т.н.). Обобщението на големината на вектор в равнината е понятието **норма**.

Определение 11. Нека F е дадено линейно пространство. Казваме, че в F е въведена **норма**, ако на всеки елемент f от F е съпоставено число $\|f\|$ (норма на f) и са в сила условията:

1. $\|f\| \geq 0$, като $\|f\| = 0$ тогава и само тогава, когато $f \equiv 0$;
2. $\|\lambda f\| = |\lambda| \|f\|$, $\forall \lambda \in \mathbb{R}$;
3. $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|$, $\forall f, g \in F$.

С други думи, така дефинирана, нормата може да се използва, за да се дефинира разстояние между два елемента на пространството F по следния начин:

$$\rho(f, g) = \|f - g\|, \quad \forall f, g \in F.$$

Иначе казано, така мерим колко голяма е грешката (разликата) между тях.

Могат да се въведат различни критерии (норми), които да удовлетворяват така дефинираните абстрактно понятия. Да дадем два примера за може би най-често използваните норми във функционални пространства и породените от тях разстояния:

- **равномерна норма**

$$\|f\|_{C[a,b]} = \max_{x \in [a,b]} |f(x)|.$$

Тя поражда **равномерно разстояние**

$$\rho(f, g) = \|f - g\|_{C[a,b]} = \max_{x \in [a,b]} |f(x) - g(x)|.$$

- **средноквадратична норма с тегло $\mu(x)$**

$$\|f\|_{L_2[a,b]} = \sqrt{\int_a^b \mu(x) f^2(x) dx}.$$

Тя поражда **средноквадратично разстояние**

$$\rho(f, g) = \|f - g\|_{L_2[a,b]} = \sqrt{\int_a^b \mu(x) (f(x) - g(x))^2 dx}.$$

И така, да припомним, че общата задача, която решаваме, е следната. Дадена е функция f от линейното пространство F . Търсим нейно приближение (нека го наречем p^*) от някое крайномерно подпространство на F , като p^* е възможно най-близко (в някакъв смисъл) до f .

След като имаме въведена норма (и съответно критерий за това колко близо са два обекта), то вече възниква естествено въпросът за най-доброто приближение на дадена функция f с елемент от крайномерното подпространство, по отношение на въведената норма и породеното от нея разстояние. По-точно казано, елемент на най-добро приближение от $\Omega_n \subset F$ е елементът $p^* \in \Omega_n$, за който

$$\|f - p^*\| = \inf_{p \in \Omega_n} \rho(f, p) = \inf_{p \in \Omega_n} \|f - p\|.$$

Разстоянието между f и p^* се нарича най-добро приближение на f с елементи от Ω_n . Ще го бележим с $E_n(f)$. Да припомним, че всяка функция от крайномерното линейно пространство Ω_n се задава като линейна комбинация на n независими функции (които образуват базис в Ω_n), т.е.

$$\Omega_n := \{\varphi : \varphi = a_1\varphi_1(x) + \dots + a_n\varphi_n(x), (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n, \varphi_i(x) \in F\}$$

Интересен е въпросът за съществуване и единственост на елемента на най-добро приближение в различни пространства с въведена норма. Оказва се, че за всяко линейно нормирано пространство съществува такъв елемент.

Теорема 13. Нека F е **линейно нормирано пространство**. Нека $\varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ са линейно независими елементи на F и Ω_n е линейното пространство, породено от тях. Тогава $\forall f \in F$ **съществува** елемент на най-добро приближение от Ω_n по отношение на разстоянието, породено от нормата на F .

Въпросът за единствеността му обаче е малко по-сложен. Може да се покаже, че е в сила следната теорема.

Теорема 14. Ако F е **строго нормирано пространство**, то $\forall f \in F$ съществува **единствен** елемент на най-добро приближение от Ω_n .

Определение 12. Ще казваме, че нормираното пространство F е строго нормирано, ако от равенството $\|f + g\| = \|f\| + \|g\|$ следва, че елементите f и g от F са линейно зависими.

- *Строго нормирано пространство е \mathbb{R}^n . Например в него можем да въведем Евклидова норма, т.е.*

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2},$$

където $\vec{v} = (v_1, \dots, v_n)^T$.

- *Пример за строго нормирано линейно функционално пространство е линейно пространство с въведено скалярно произведение (Хилбертово пространство). За тях ще говорим малко по-късно в курса.*

Нека обаче подчертаем, че пространството може да не е строго нормирано и въпреки това елементът на най-добро приближение да е единствен.

10.2 Равномерно приближение на непрекъснати функции с алгебрични полиноми

Нека разгледаме пространството от непрекъснати функции $C[a, b]$. Ясно е, че последното е линейно. Нормираме го, като въвеждаме в него равномерна норма:

$$\|f\|_{C[a,b]} := \max_{x \in [a,b]} |f(x)|.$$

Последната пораждаше разстояние

$$\rho(f, g) = \max_{x \in [a, b]} |f(x) - g(x)|.$$

Преди да разгледаме задачата за намиране на равномерно приближение на $f \in C[a, b]$ с елемент от някое крайномерно подпространство на $C[a, b]$, да разгледаме един нагледен пример за равномерната норма.

Задача 32. Да се намерят равномерните норми в интервала $[0, 1]$ на функциите $f(x) = x$ и $g(x) = x^2$ и равномерното разстояние между тях в същия интервал.

Решение. Прилагаме дефиницията

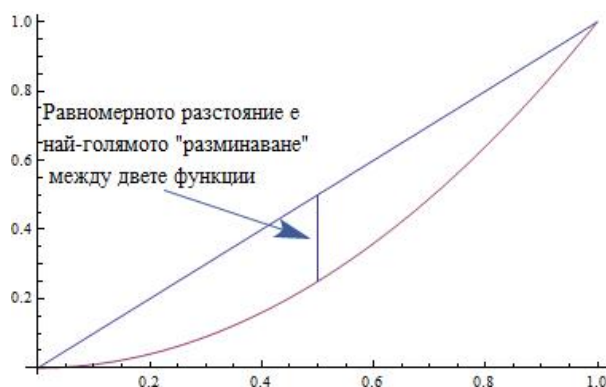
$$\|f\|_{C[0,1]} = \max_{x \in [0,1]} |x| = 1$$

$$\|g\|_{C[0,1]} = \max_{x \in [0,1]} |x^2| = 1$$

Равномерното разстояние между двете функции е

$$\|f - g\|_{C[0,1]} = \max_{x \in [0,1]} |x - x^2| = \frac{1}{4}.$$

Да отбележим, че последният екстремум се достига при $x = \frac{1}{2}$ (върха на параболата). Геометричният смисъл на равномерното разстояние между $f(x)$ и $g(x)$ е илюстриран на следващата фигура. Това е най-голямата (по абсолютна стойност) разлика между стойностите на двете функции в интервала.



□

Да разгледаме задачата за намиране на **най-добро равномерно приближение** (НДРП) на $f \in C[a, b]$ в пространството от алгебрични полиноми π_n (очевидно $\pi_n \subset C[a, b]$). Ако инфимумът се достига за някакъв полином p^* от π_n , т.е. $E_n(f) = \|f - p^*\|$, то p^* ще наричаме **полином на най-добро равномерно приближение** (ПНДРП). Последният, разбира се, съществува, тъй като пространството е нормирано. Оказва се, че пространството $C[a, b]$ не е строго нормирано и единствеността на елемента не следва от общата формулировка за нормирани пространства.

Полиномът на най-добро равномерно приближение може да се намери в малко случаи, но това става посредством така наречената теорема на Чебишов за алтернанса.

Теорема 15 (Теорема на Чебишов за алтернанса). Нека f е произволна непрекъсната функция в крайния и затворен интервал $[a, b]$. Необходимо и достатъчно условие полиномът P от π_n да бъде полином на най-добро равномерно приближение за f от n -та степен в $[a, b]$ е да съществуват $n + 2$ точки $\{x_i\}_{i=0}^{n+1}$ от $[a, b]$ такива, че $a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_{n+1} \leq b$ и

$$f(x_i) - P(x_i) = (-1)^i \epsilon \|f - P\|, \quad i = 0, \dots, n+1,$$

където $\epsilon = 1$ или $\epsilon = -1$.

Точките $x_0 < \dots < x_{n+1}$, които удовлетворяват условието на теоремата, ще наричаме **точки на алтернанс**. В горната теорема $\|f - P\| = \max_{x \in [a,b]} |f(x) - P(x)|$, откъдето следва, че в точките на алтернанс се допуска най-голямата по модул грешка в целия интервал $[a, b]$. Да обърнем внимание, че точките на алтернанс за полином от π_n са **поне** $n + 2$, т.е. могат да бъдат и повече.

Следствие 1. За всяка непрекъсната в $[a, b]$ функция f съществува единствен полином на най-добро равномерно приближение от степен n .

Нека сега разгледаме няколко задачи за намиране на полином на най-добро равномерно приближение, като използваме, че той изпълнява условието от теоремата на Чебишов за алтернанса.

Задача 33. Намерете полинома на най-добро равномерно приближение от първа степен за функцията \sqrt{x} в интервала $[0, 1]$.

Решение. Нека означим полинома на най-добро равномерно приближение с $p(x) = cx + d$ и $\|f(x) - p(x)\| = \max_{x \in [0,1]} |f - p| =: L$. От теоремата на Чебишов за алтернанса следва, че съществуват поне три точки на алтернанс $x_0 < x_1 < x_2$. Тогава е изпълнено:

$$\begin{aligned} f(x_0) - (cx_0 + d) &= \epsilon L, \\ f(x_1) - (cx_1 + d) &= -\epsilon L, \\ f(x_2) - (cx_2 + d) &= \epsilon L, \end{aligned}$$

където $\epsilon \in \{-1, 1\}$. Както казахме, в точките на алтернанс се допуска най-голямата по модул грешка между функцията и полинома, т.е. в тях трябва да имаме екстремум. Тъй като

$$(f - p)' = (\sqrt{x} - (cx + d))' = \frac{1 - 2c\sqrt{x}}{2\sqrt{x}},$$

то функцията на грешката има екстремум в $x = 1/(4c^2)$. Тогава точките на алтернанс ще са в двата края на интервала и последната, т.е. $0, 1/(4c^2), 1$. И така, за да определим коефициентите, заместваме условията в системата:

$$\begin{aligned} f(0) - (0c + d) &= \epsilon L, & -d &= \epsilon L, \\ f(1/(2c)^2) - (1/(4c) + d) &= -\epsilon L, & \Leftrightarrow & 1/(2c) - (1/(4c) + d) = -\epsilon L, \\ f(1) - (c + d) &= \epsilon L, & 1 - (c + d) &= \epsilon L. \end{aligned}$$

От последната следва, че

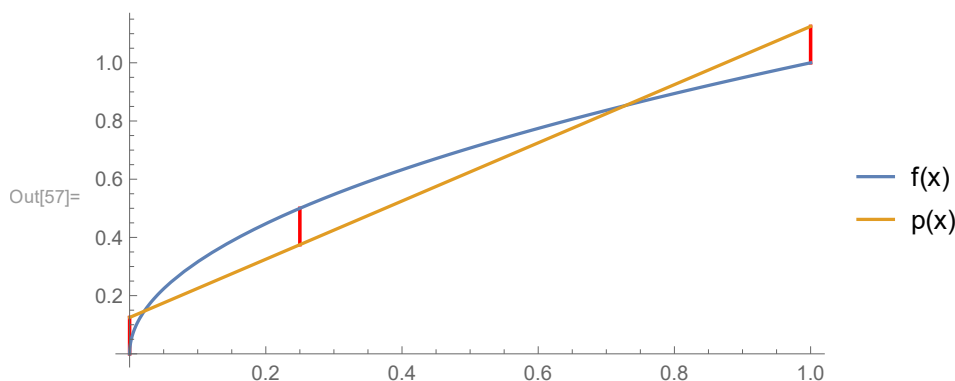
$$-d = -[1/(2c) - (1/(4c) + d)] = 1 - (c + d),$$

което е еквивалентно на:

$$\begin{aligned} -d &= -1/(2c) + 1/(4c) + d, \\ -d &= 1 - c - d. \end{aligned}$$

Решаваме тази система и получаваме $c = 1, d = 1/8$, т.е. $p(x) = x + 1/8$.

Точките на алтернанс са илюстрирани на следващата фигура.



Да обърнем внимание, че най-доброто равномерно приближение е $1/8$. □

Задача 34. Да се намери ПНДРП за функцията $f(x) = 1/(1+x)$ от π_1 в интервала $[0, 1]$.

Решение. Да означим ПНДРП с $p(x) = ax + b$, $\max_{x \in [0,1]} |f - p| =: L$. Ще постъпим аналогично на горната задача. Точките на алтернанс трябва да са точки на екстремум в интервала $[0, 1]$ за функцията на грешката $1/(1+x) - (ax + b)$. Да разгледаме първата ѝ производна:

$$\left(\frac{1}{1+x} - (ax + b) \right)' = -\frac{1}{(1+x)^2} - a = \frac{-1 - a(1+x)^2}{(1+x)^2}.$$

Последната се нулира за $x = -1 \pm \sqrt{\frac{1}{-a}}$ в случая, когато $a < 0$. Това означава, че в $[0, 1]$ можем да имаме само една положителна точка на екстремум. С други думи, точките на алтернанс са $x_0 = 0, x_1 = -1 + \sqrt{\frac{1}{-a}}, x_2 = 1$. Отново заместваме всички получени условия за функцията на грешката и точките на алтернанс в една система:

$$\begin{aligned} f(0) - (0a + b) &= \epsilon L, \\ f(x_1) - (ax_1 + b) &= -\epsilon L, \\ f(1) - (a + b) &= \epsilon L \end{aligned} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{aligned} 1 - b &= \epsilon L, \\ \frac{1}{1+x_1} - (ax_1 + b) &= -\epsilon L, \\ \frac{1}{2} - (a + b) &= \epsilon L. \end{aligned}$$

Така получените уравнения влекат

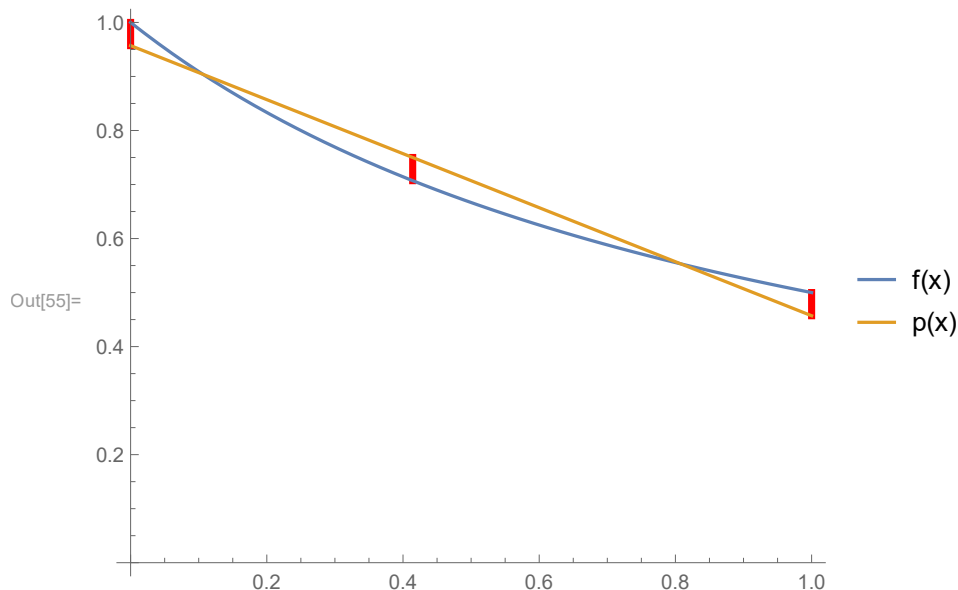
$$1 - b = -\left(\frac{1}{1+x_1} - (ax_1 + b) \right) = \frac{1}{2} - (a + b).$$

Като приравним първото и третото получаваме $a = -1/2$. Следователно $x_1 = -1 + \sqrt{2}$.

Остава да определим $b = \frac{2\sqrt{2} + 1}{4}$. Следователно полученият полином на най-добро равномерно

приближение е $p(x) = -\frac{1}{2}x + \frac{2\sqrt{2} + 1}{4}$. Най-доброто приближение е стойността на максималната по модул грешка, която може да се намери в коя да е точка на алтернанс.

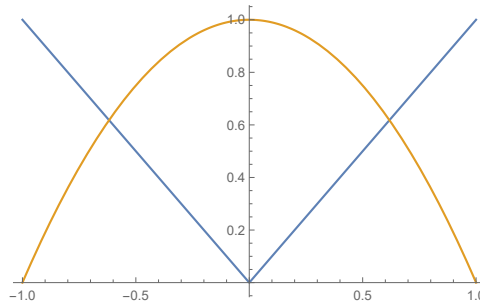
Следователно най-доброто равномерно приближение е равно на $\left| 1 - \frac{2\sqrt{2} + 1}{4} \right| = \frac{3 - 2\sqrt{2}}{4}$.



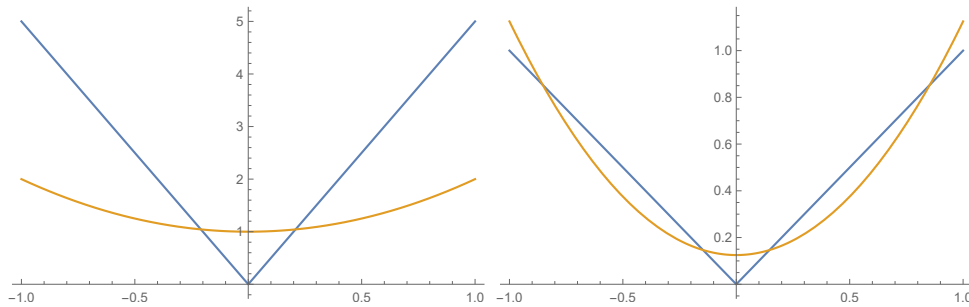
□

Задача 35. Да се намери ПНДРП за функцията $f(x) = |x|$ от π_2 в интервала $[-1, 1]$.

Решение. Търсим полинома $p(x) = ax^2 + bx + c$. Трябва да намерим поне 4 точки на алтернанс. По подобен начин на предходните задачи можем да се убедим, че -1 и 1 трябва да са точки на алтернанс. Бихме могли да подходим аналогично на предходните задачи за определяне на останалите, но изчисленията ще станат много времеемки. Нека се опитаме да използваме добитата вече интуиция, за да съобразим как изглеждат те. Има няколко възможности за положението на параболата спрямо графиката на модулната функция. Очевидно, ако параболата е отворена надолу, няма как да има повече от три точки на алтернанс.



Нека параболата е отворена отгоре. Да разгледаме следните възможни взаимни положения на двете графики.



Ясно е, че в първия случай не може да има повече от три точки на алтернанс. Интересният случай обаче е вторият. Той удовлетворява условията на теоремата, тъй като ще има 5 точки на алтернанс (трябват **поне** 4).

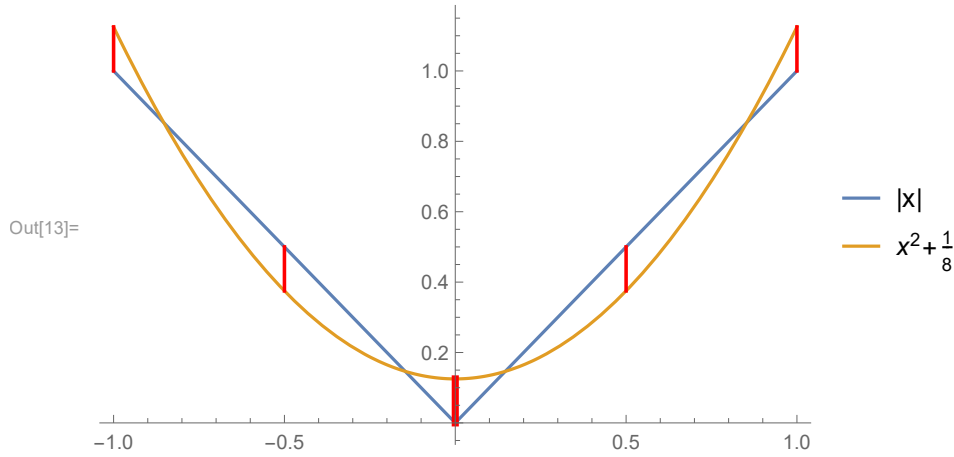
От последната картинка е ясно, че точките на алтернанс са -1, α , 0, β , 1. Уравнението $p'(x) - f'(x) = 0$ е еквивалентно или на $2ax + b + 1 = 0$ (при $x < 0$), или на $2ax + b - 1 = 0$ (при $x > 0$). Така получаваме $\alpha = \frac{-1-b}{2a}$ и $\beta = \frac{1-b}{2a}$. И така, трябва да е в сила

$$p(-1) - f(-1) = -(p(\alpha) - f(\alpha)) = p(0) - f(0) = -(p(\beta) - f(\beta)) = p(1) - f(1).$$

Лесно се вижда от $p(-1) - f(-1) = p(1) - f(1)$, че $b = 0$. Имаме още

$$a + c - 1 = -\left(a\frac{1}{4a^2} + c - \frac{1}{2a}\right) = c.$$

Като приравним първия и последния израз, получаваме $a = 1$. След това, като приравним първия и втория, получаваме $c = 1/8$.



□

Задача 36. Да се намери ПНДРП за функцията $f(x) = |x|$ от π_1 в интервала $[-1, 1]$.

Задача 37. Нека $f \in C[a, b]$, $\max_{x \in [a, b]} f(x) = M$, $\min_{x \in [a, b]} f(x) = m$. Намерете ПНДРП $p(x) \in \pi_0$ за f в интервала $[a, b]$.

Решение. Нека $p_0(x) \in \pi_0$ е търсеният полином. Ясно е, че тъй като той е константа, максималната по модул грешка ще се достига или при максимума на функцията f , или при нейния минимум. Тъй като търсим поне две точки на алтернанс, то те ще съвпадат с точките, в които функцията има максимум и минимум. Следователно $\|f - p\|$ трябва да се достига и в максимума, и в минимума и константата трябва да е на равни разстояния от m и M . Тази константа е, разбира се, средноаритметичното на m и M . Следователно $p_0(x) = \frac{m + M}{2}$. □

Задача 38. Да се докаже, че най-доброто равномерно приближение с полинома от π_n за функцията $f(x) = \cos x$ в $[-1, 1]$ удовлетворява неравенството $E_n(f) \leq \frac{1}{2^n(n+1)!}$.

Решение. Нека означим с p^* полинома на най-добро равномерно приближение от π_n . Да припомним, че $E_n(f) = \inf_{p \in \pi_n} \|f - p\| = \|f - p^*\|$. Последното означава, че $E_n(f) \leq \|f - p\|, \forall p \in \pi_n$. Следователно можем да оценим отгоре най-доброто приближение с някое друго “добро” приближение, което вече знаем. Ние знаем как да оценяваме грешката при интерполация, като знаем, че най-добрата оценка на грешката се получава, ако изберем за интерполационни възли нулите на съответния полином на Чебишов. Нека разгледаме интерполационния полином на Лагранж $L_n(f; x) \in \pi_n$, който интерполира f в нулите ξ_0, \dots, ξ_n на полинома на Чебишов от първи род от $(n+1)$ -ва степен

$$T_{n+1}(x) = \cos((n+1) \arccos x), \quad x \in [-1, 1].$$

От теоремата за оценка на грешката знаем, че е в сила:

$$\begin{aligned} \|f(x) - L_n(f; x)\| &= \max_{x \in [-1, 1]} |f(x) - L_n(f; x)| \\ &\leq \frac{\max_{\xi \in [-1, 1]} |f^{(n+1)}(\xi)|}{(n+1)!} \max_{x \in [-1, 1]} |(x - \xi_0) \dots (x - \xi_n)| \\ &\leq \frac{1}{2^n(n+1)!}. \end{aligned}$$

От последното следва, че е в сила

$$E_n(f) \leq \|f - L_n(f; x)\| \leq \frac{1}{2^n(n+1)!}.$$

□