

Математика.

Лекция 13.

Исследование функций.

# Асимптоты графика функции

**Асимптота** к графику функции  $y = f(x)$  - это прямая, к которой приближается точка  $M(x, y)$ , лежащая на графике, при неограниченном удалении ее от начала координат.

Асимптоты бывают наклонные  $y = kx + b$  (как частный случай – горизонтальные:  $y = b$  ) или вертикальные:  $x = a$ .

# Вертикальные асимптоты.

Прямая  $x = a$  является вертикальной асимптотой графика функции, если хотя бы один из односторонних пределов (левый или правый) функции в точке  $x = a$  равен  $\pm \infty$ :

$$\lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = +\infty \quad \text{и / или} \quad \lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = -\infty \quad \text{и/или}$$

$$\lim_{x \rightarrow a-0} f(x) = +\infty \quad \text{и / или} \quad \lim_{x \rightarrow a-0} f(x) = -\infty .$$

Вертикальные асимптоты могут находиться:

- в точках разрыва 2 рода;
- на границах области определения.

**Пример.** График функции  $y = \frac{1}{x-2}$  имеет вертикальную

асимптоту  $x=2$ . Действительно,

$$\lim_{x \rightarrow 2+0} \frac{1}{x-2} = +\infty, \quad \lim_{x \rightarrow 2-0} \frac{1}{x-2} = -\infty.$$

Точка  $x=2$  – точка разрыва 2 рода функции.

**Пример.** График функции  $y = \ln x$  имеет вертикальную асимптоту  $x=0$ . Действительно,  $\lim_{x \rightarrow 0+0} \ln x = -\infty$ . Область определения

функции – интервал  $(0, +\infty)$ . Точка  $x=0$  – граница области определения.

# Наклонные асимптоты.

Прямая  $y = kx + b$  является наклонной асимптотой графика функции в  $+\infty$  ( $-\infty$ ), если функция представима в виде  $f(x) = kx + b + \alpha(x)$  ( $\alpha(x)$  - бесконечно малая функция).

Наклонная асимптота  $y = k_1x + b_1$  существует в  $-\infty$ , если существуют конечные пределы:

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x}, \quad b_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - k_1x).$$

Аналогично для  $y = k_2x + b_2$  в  $+\infty$ :

$$k_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x}, \quad b_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - k_2x).$$

В частных случаях возможны значения коэффициентов наклона  $k_1 = 0$  и/или  $k_2 = 0$  - горизонтальные асимптоты.

В общем случае в  $-\infty$  и в  $+\infty$  для графика одной функции возможны различные асимптоты.

**Пример.** Найти асимптоты графика функции  $y = \frac{2x-1}{x-1}$ .

*Решение.* Функция определена, если знаменатель  $x-1 \neq 0$ ,  $x \neq 1$ .

Таким образом, область определения - объединение интервалов  $(-\infty, 1) \cup (1, +\infty)$ . Точка  $x=1$  - точка разрыва.

Так как  $\lim_{x \rightarrow 1+0} \frac{2x-1}{x-1} = +\infty$ ,  $\lim_{x \rightarrow 1-0} \frac{2x-1}{x-1} = -\infty$ ,

прямая  $x=1$  является вертикальной асимптотой. Далее имеем:

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x-1}{x(x-1)} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x-1}{x^2-x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{2x}{x^2} - \frac{1}{x^2}}{\frac{x}{x^2} - \frac{1}{x^2}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2 - \frac{1}{x^2}}{1 - \frac{1}{x}} = 0,$$

так как  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2}{x} = 0$ ,  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^2} = 0$ ;

$$b = \lim_{x \rightarrow \infty} (f(x) - kx) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x-1}{x-1} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{2x}{x} - \frac{1}{x}}{\frac{x}{x} - \frac{1}{x}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2 - \frac{1}{x}}{1 - \frac{1}{x}} = 2.$$

Следовательно, прямая  $y=kx+b$ , то есть  $y=2$  - горизонтальная асимптота .

**Пример.** Найдем асимптоты графика функции  $y = \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2}$ .

а) На вертикальную асимптоту подозрительна точка  $x=1$ , которую и исследуем:

$$\lim_{x \rightarrow 1-0} \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2} = \left( \frac{8}{+0} \right) = +\infty;$$

$$\lim_{x \rightarrow 1+0} \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2} = \left( \frac{8}{+0} \right) = +\infty.$$

Т.е. воображаемая вертикальная прямая  $x=1$  является вертикальной асимптотой, при приближении к которой слева и справа график функции уходит вверх.

б) Для исследования на наклонную асимптоту вычислим:

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2 x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^3}{x^3} = 1;$$

$$b_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left( \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2} - 1 \cdot x \right) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{(x+1)^3 - x \cdot (x-1)^2}{(x-1)^2} =$$

$$= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^3 + 3 \cdot 1^2 \cdot x + 3 \cdot 1 \cdot x^2 + 1^3 - x \cdot (x^2 - 2x + 1)}{(x-1)^2} =$$

$$= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{5x^2 + 2x + 1}{x^2 - 2x + 1} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{5x^2}{x^2} = 5.$$

Т.к. полученные пределы конечны (получены числа), то на  $-\infty$  имеем наклонную асимптоту  $y = x + 5$ .

Аналогично,

$$k_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2 x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^3}{x^3} = 1;$$

$$\begin{aligned} b_2 &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left( \frac{(x+1)^3}{(x-1)^2} - 1 \cdot x \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x+1)^3 - x \cdot (x-1)^2}{(x-1)^2} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{5x^2 + 2x + 1}{x^2 - 2x + 1} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{5x^2}{x^2} = 5. \end{aligned}$$

Т.е. и на  $+\infty$  существует та же асимптота  $y = x + 5$ .

# Общая схема исследования функции и построения графика.

План полного исследования функции:

1. По формуле функции выяснить:
  - а) область определения функции;
  - б) симметричность графика (четность-нечетность функции);
  - в) периодичность функции;
  - г) непрерывность функции, возможные точки разрыва и поведение функции вблизи неё;
  - д) асимптоты графика (вертикальные и наклонные);
  - е) точки пересечения графика с осями координат и интервалы знакопостоянства функции.

## План полного исследования функции:

2. Вычислить первую производную функции и по ней выяснить:

- а) критические точки 1-го рода;
- б) интервалы монотонности функции (интервалы знакопостоянства первой производной);
- в) точки локального экстремума;
- г) значения функции в точках экстремума.

3. Вычислить вторую производную функции и по ней выяснить:

- а) критические точки 2-го рода;
- б) интервалы выпуклости функции вверх и вниз (интервалы знакопостоянства второй производной);
- в) точки перегиба;
- г) значения функции в точках перегиба.

4. Построить график функции по результатам исследования.

**Пример** полного исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

1. Проанализируем формулу функции.

а) Область определения функции  $D(y)$ :  $x \neq 2$ .

б) Т.к.  $y(-x) = \frac{8(-x) - 3(-x)^2}{(-x - 2)^2} = \frac{-8x - 3x^2}{(x + 2)^2}$ , то функция не является ни четной, ни нечетной, она общего вида. Т.е. её график несимметричен.

в) Т.к. в формуле данной функции нет периодических составляющих, то она неперiodическая.

**Пример** полного исследования функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

г) Подозрительна на разрыв точка  $x = 2$ . Выясним тип разрыва и поведение функции вблизи этой точки:

$$\lim_{x \rightarrow 2-0} \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} = \left( \frac{4}{+0} \right) = +\infty$$

(т.е. при приближении к  $x = 2$  слева график уходит вверх);

$$\lim_{x \rightarrow 2+0} \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} = \left( \frac{4}{+0} \right) = +\infty$$

(т.е. при приближении к  $x = 2$  справа график также уходит вверх).

Т.о. в точке  $x = 2$  функция терпит разрыв 2-го рода.

**Пример** полного исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

д) Определим, есть ли у графика функции асимптоты.

Выше уже выяснено, что оба односторонних предела в точке  $x = 2$  равны  $+\infty$ , т.е. у графика данной функции есть вертикальная асимптота – прямая  $x = 2$ .

Для нахождения наклонной асимптоты  $y = k_1x + b_1$  при  $x \rightarrow -\infty$  (т.е. далеко влево от начала координат) вычислим пределы:

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2 x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{-3x^2}{x^3} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{-3}{x} = \left( \frac{-3}{-\infty} \right) = 0;$$

$$b_1 = \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - k_1x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left( \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} - 0 \cdot x \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-3x^2}{x^2} = -3.$$

Т.к. получены конечные пределы, то при  $x \rightarrow -\infty$  имеем наклонную (а именно - горизонтальную) асимптоту  $y = 0x - 3 = -3$ .

**Пример** полного исследования функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

Аналогичными вычислениями получаем при  $x \rightarrow +\infty$ :

$$k_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2 x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-3x^2}{x^3} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-3}{x} = \left( \frac{-3}{+\infty} \right) = 0;$$

$$b_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - k_1 x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left( \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} - 0 \cdot x \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} =$$

$$= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-3x^2}{x^2} = -3$$

Горизонтальная асимптота  $y = -3$  при  $x \rightarrow +\infty$ .

**Пример** полного исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

е) Найдем точки пересечения функции с осями координат.

В точках пересечения графика с осью  $OX$  координаты  $y$  равны 0:

$$y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad 8x - 3x^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad x(8 - 3x) = 0.$$

Это точки с абсциссами  $x = 0$  и  $x = \frac{8}{3}$ .

В точках пересечения графика с осью  $OY$  координаты  $x$  равны 0:

$$y(0) = \frac{8 \cdot 0 - 3 \cdot 0^2}{(0 - 2)^2} = 0.$$

**Пример** полного исследования функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x-2)^2}$  с построением графика.

Выясним интервалы знакопостоянства функции. Для этого нанесем на ось  $OX$  особые точки: точки разрыва ( $x=2$ ) и точки пересечения с осью  $OX$  ( $x=0$ ,  $x=8/3$ ). Расставим в интервалах знаки функции, подставив произвольные точки из этих интервалов:

$$y(-1) = \frac{8 \cdot (-1) - 3 \cdot (-1)^2}{(-1-2)^2} = \frac{-8-3}{(-3)^2} = -\frac{11}{9} < 0;$$

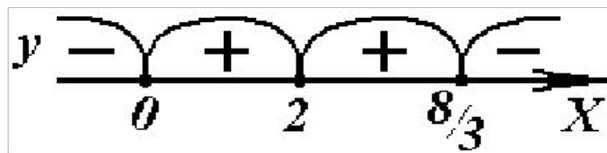
$$y(1) = \frac{8 \cdot 1 - 3 \cdot 1^2}{(1-2)^2} = \frac{8-3}{(-1)^2} = \frac{5}{1} = 5 > 0;$$

$$y(7/3) = \frac{8 \cdot (7/3) - 3 \cdot (7/3)^2}{(7/3-2)^2} = \frac{56/3 - 49/3}{(1/3)^2} = \frac{7/3}{1/9} = 21 > 0;$$

$$y(3) = \frac{8 \cdot 3 - 3 \cdot 3^2}{(3-2)^2} = \frac{24-27}{1^2} = \frac{-3}{1} = -3 < 0.$$

Значит, в интервалах  $(-\infty; 0)$  и  $(8/3; +\infty)$  график функции проходит ниже оси

$OX$ , а в  $(0; 2)$  и  $(2; 8/3)$  - выше оси  $OX$ .



**Пример** полного исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика

2. Найдет производную функции:

$$\begin{aligned} y' &= \left( \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2} \right)' = \frac{(8 - 6x)(x - 2)^2 - (8x - 3x^2)2(x - 2)}{(x - 2)^4} = \\ &= \frac{(8 - 6x)(x - 2) - 2(8x - 3x^2)}{(x - 2)^3} = \frac{8x - 16 - 6x^2 + 12x - 16x + 6x^2}{(x - 2)^3} = \\ &= \frac{4x - 16}{(x - 2)^3} = \frac{4(x - 4)}{(x - 2)^3}. \end{aligned}$$

а) Найдем критические точки 1-го рода.

По необходимому условию локального экстремума это точки области определения, в которых первая производная равна 0, стремится к бесконечности или не существует.

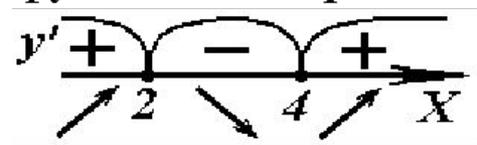
Производная данной функции не существует в точке  $x = 2$ , но эта точка является точкой разрыва и быть экстремумом не может.

Приравняем производную нулю:  $y' = \frac{4(x - 4)}{(x - 2)^3} = 0 \Rightarrow x = 4$ .

**Пример** полного исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

б) Выясним интервалы знакопостоянства первой производной, т.е. возрастания-убывания функции. Нанесем точки  $x=2$  и  $x=4$  на ось и расставим знаки производной.

Анализ знаков производной показывает, что на интервалах  $(-\infty; 2)$  и  $(4; +\infty)$  функция возрастает, на  $(2; 4)$  - убывает.



в) Определим точки локального экстремума.

По достаточному условию локального экстремума это точки области определения, при переходе через которые производная меняет знак. Т.к. точка  $x=2$  является точкой разрыва, то она не является точкой экстремума, несмотря на смену знака первой производной.

А в точке  $x=4$  знак первой производной меняется с «+» на «-», т.е. это точка локального минимума.

г) Чтобы нанести в дальнейшем эту точку на график, вычислим значение

$$\text{функции в ней: } y(4) = \frac{8 \cdot 4 - 3 \cdot 4^2}{(4 - 2)^2} = \frac{32 - 48}{2^2} = \frac{-16}{4} = -4.$$

**Пример** полного исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

3. Найдем вторую производную анализируемой функции:

$$y'' = \left( \frac{4(x-4)}{(x-2)^3} \right)' = \frac{4(x-2)^3 - 4(x-4)3(x-2)^2}{(x-2)^6} = \frac{4(x-2) - 12(x-4)}{(x-2)^4} =$$
$$= \frac{4x - 8 - 12x + 48}{(x-2)^4} = \frac{-8x + 40}{(x-2)^4} = \frac{8(5-x)}{(x-2)^4}.$$

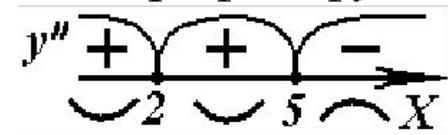
а) Найдем критические точки 2-го рода. По необходимому условию точек перегиба это точки области определения, в которых вторая производная равна 0, стремится к бесконечности или не существует.

В данном случае это точки  $x=2$  и  $x=5$ . Но первая точка является точкой разрыва. А вот  $x=5$  - критическая точка 2-го рода.

**Пример** полное исследование функции  $y = \frac{8x - 3x^2}{(x - 2)^2}$  с построением графика.

б) Выясним интервалы знакопостоянства второй производной, т.е. характер выпуклости функции. Нанесем точки  $x = 2$  и  $x = 5$  на ось и расставим знаки второй производной.

Анализ знаков второй производной показывает, что на интервалах  $(-\infty; 2)$  и  $(2; 5)$  график функции выпуклый вниз, на  $(5; +\infty)$  - выпуклый вверх.



в) Определим точки перегиба.

По достаточному признаку перегиба это точки области определения, при переходе через которые  $y''$  меняет знак.

Знак второй производной (направление выпуклости графика) меняется в точке  $x = 5$ , которая принадлежит области определения. Она является точкой перегиба.

г) Вычислим значение функции в точке перегиба:

$$y(5) = \frac{8 \cdot 5 - 3 \cdot 5^2}{(5 - 2)^2} = \frac{40 - 75}{3^2} = \frac{-35}{9} = -3,89.$$

4. Проанализируем полученные вычисления и построим график.

Нанесем штриховой линией вертикальную асимптоту  $x=2$ . Как показывают расчеты (п.1-г), график функции при подходе к этой прямой уходит вверх при приближении как слева, так и справа.

Нанесем горизонтальную асимптоту  $y=-3$ . Т.к. функция неперiodическая, то приближается к ней только с одной стороны (сверху или снизу). Пока не ясно, с какой именно. На интервале  $(-\infty;2)$  функция только возрастает, причем является вогнутой. И на этом интервале нет экстремумов. Значит, график до точки  $x=2$  проходит именно так, как изображено на рисунке.

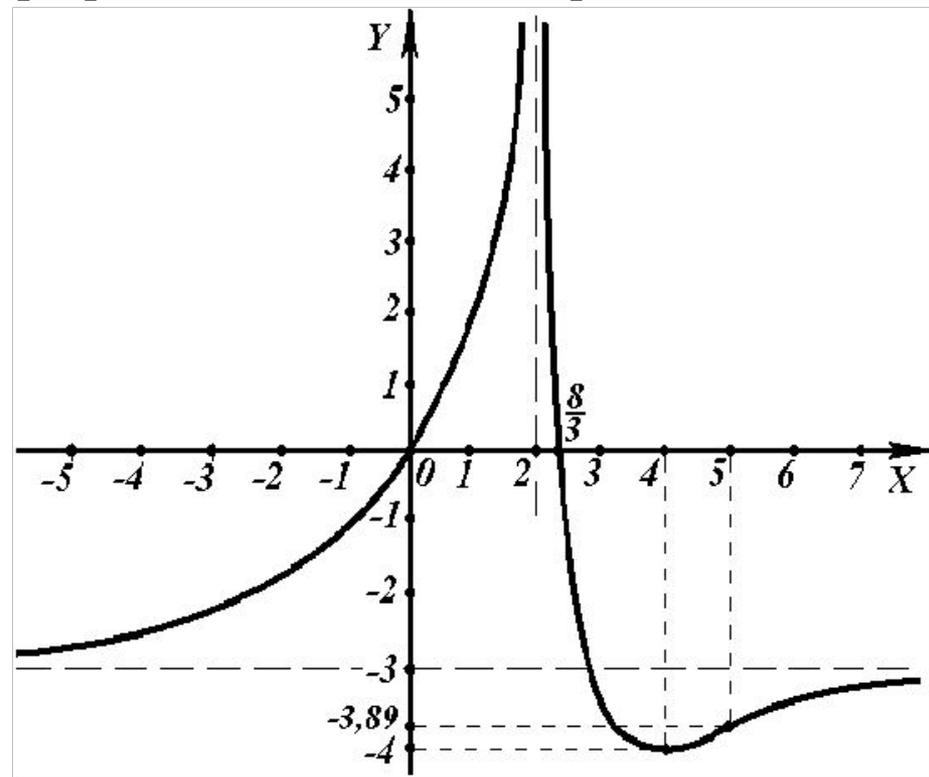


График после точки  $x=2$  сначала убывает до точки  $(4;-4)$ , в которой он имеет минимум. После этого функция возрастает. Но как именно? График вогнут вплоть до точки перегиба  $x=5$ , после чего становится выпуклым. Но выпуклым он мог бы быть по-разному. Здесь он асимптотически приближается к горизонтальной прямой  $y=-3$ , почти сливаясь с ней в  $+\infty$ .