

СОДЕРЖАНИЕ

1 Решение нелинейных уравнений	3
1.1 Итервальный метод	4
1.2 Метод бисекции	5
1.3 Метод выделения корней.	7
1.4 Численное решение нелинейного уравнения методом бисекции	8
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	15

1 Решение нелинейных уравнений

Пусть задана функция $f(x)$ действительного переменного и необходимо найти корни уравнения или, что то же самое, нули функции $f(x)$:

$$f(x) = 0. \quad (1)$$

На примере алгебраического многочлена известно, что нули $f(x)$ могут быть как действительными, так и комплексными числами. Поэтому *более точная* постановка задачи состоит в нахождении корней уравнения, расположенных в заданной области комплексной плоскости. Можно рассматривать также задачу о нахождении действительных корней уравнения, которые расположены в пределах заданного отрезка $x \in [a, b]$.

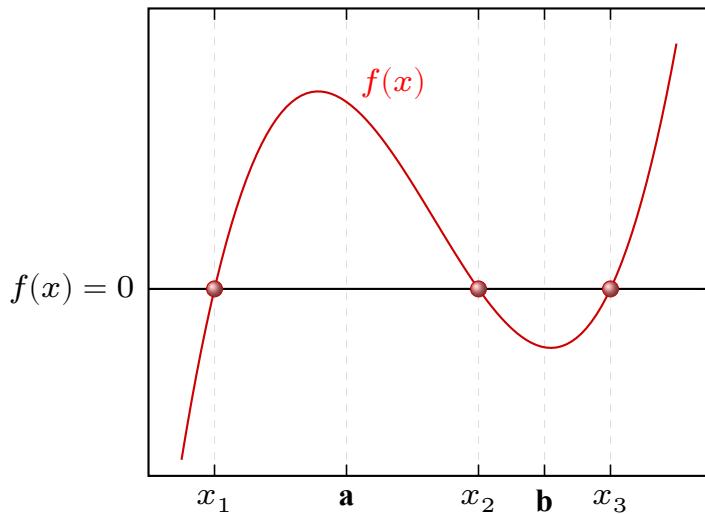


Рисунок 1 – График функции $y = f(x)$

На рисунке (1) представлены x_1 , x_2 и x_3 – действительные корни уравнения (1), т.е. $f(x_1) = 0$, $f(x_2) = 0$, $f(x_3) = 0$

Задача нахождения корней уравнения $f(x) = 0$ обычно решается в два этапа:

- 1) На первом этапе изучается расположение корней (в общем случае на комплексной плоскости) и проводится их разделение, т. е. выделяются области в комплексной плоскости, содержащие только один корень. Кроме того, изучается вопрос о кратности корней. Тем самым находятся начальные приближения для корней уравнения.
- 2) На втором этапе, используя заданное начальное приближение, строится ите-

рациональный процесс, позволяющий уточнить значение отыскиваемого корня.

Следует отметить, что не существует каких-то общих регулярных приемов решения задачи о расположении корней произвольной функции $f(x)$.

Численные методы решения нелинейных уравнений являются, как правило, итерационными методами, которые предполагают задание достаточно близких к искомому решению начальных данных.

1.1 Итервальный метод

Итервальный метод поиска корня уравнения $f(x) = 0$ состоит следующим:

- 1) Область поиска корня $[a, b]$ разбивается на заранее заданное количество интервалов N :

$$[a, b] = [a, x_1] \cup [x_1, x_2] \cup \dots \cup [x_i, x_{i+1}] \cup \dots \cup [x_N, b]$$

- 2) Вычисляется таблица значений функции $\{f(x_i)\}$ на границах этих интервалов $\{x_i\}$.
- 3) Проводится последовательный перебор таблицы значений функции $\{f(x_i)\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$).
- 4) Если при некотором i значения функции $f(x_i)$ и $f(x_{i+1})$ имеют разные знаки, то это означает, что на интервале $x \in (x_i, x_{i+1})$ имеет по крайней мере один действительный корень уравнения $f(x) = 0$.
- 5) В качестве новой, более узкой ($|x_i, x_{i+1}| < |a, b|$), области поиска выбирается отрезок (x_i, x_{i+1}) , т.е. полагают

$$x_i = a, \quad x_{i+1} = b$$

и с помощью аналогичной процедуры (1) процесс поиска корня уравнения $f(x) = 0$ повторяют до тех пор пока, область поиска не станет меньше заранее заданной величины ε (погрешности поиска корня уравнения):

$$|a, b| < \varepsilon$$

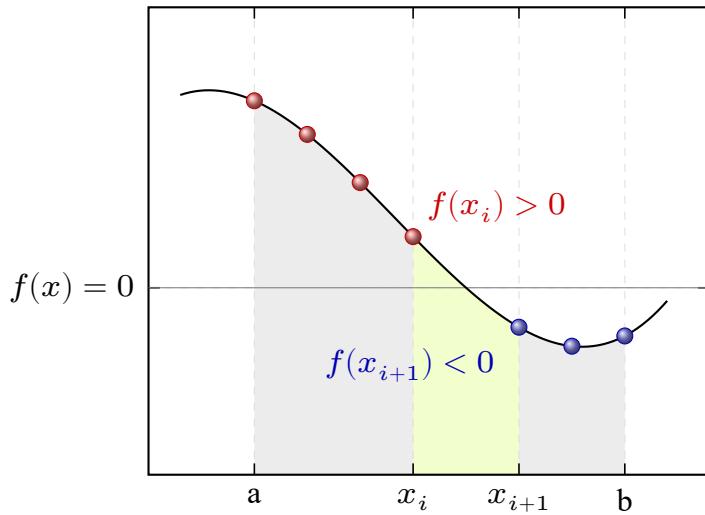


Рисунок 2 – Иллюстрация итервального метода поиска корня уравнения

1.2 Метод бисекции

Метод бисекции основан на теореме *Больцано-Коши* (теорема о промежуточном значении): если непрерывная функция $f(x)$, определённая на вещественном интервале $[a, b]$, принимает два различных значения $f(a) \neq f(b)$, тогда существует такое $c \in [a, b]$, что эта функция в этой точке принимает промежуточное значение $f(a) \leq f(c) \leq f(b)$.

Следствие теоремы Больцано-Коши (теорема о нуле непрерывной функции): если функция $f(x)$ непрерывна на некотором отрезке $[a, b]$ и на концах этого отрезка принимает значения $f(a)$ и $f(b)$ противоположных знаков, то существует точка x_0 , в которой значение функции равно нулю $f(x_0) = 0$.

Если непрерывная функция *строго монотонна* на отрезке $[a, b]$, т.е. для любого $\forall x \in [a, b]$ выполняется условие $f'(x) > 0$ либо $f'(x) < 0$, то в соответствие со следствием теоремы Больцано-Коши в пределах отрезка $[a, b]$ существует *единственный* корень уравнения $f(x) = 0$.

Метод бисекции (деления пополам) является регулярным способом поиска действительного корня уравнения $f(x) = 0$, однако для реализации этого метода необходимо *правильно выбрать область поиска*, т.е. начальный отрезок $[a, b]$ на концах которого функция $f(x)$ принимает значения разных знаков $f(a) \cdot f(b) < 0$ и в пределах этого отрезка строго монотонна $f'(x) < 0$ либо $f'(x) > 0$.

Алгоритм метода деления отрезка пополам (метод бисекции):

1) Область поиска корня уравнения отрезок $[a, b]$ делится пополам:

$$c = \frac{a + b}{2}$$

2) Вычисляется значение функции в середине отрезка $f(c)$.

3) Проводится сравнение знаков функции в середине отрезка $f(c)$ и, например, на левом конце отрезка $f(a)$:

- 1) если $f(a) \cdot f(c) < 0$, функция $f(x)$ на концах отрезка $[a, c]$ принимает значения разных знаков, следовательно, искомый корень уравнения $f(x) = 0$ находится внутри отрезка $[a, c]$, поэтому правый конец отрезка “переносится“ в его середину.
- 2) если $f(a) \cdot f(c) > 0$, функция $f(x)$ на концах отрезка $[a, c]$ принимает значения одного знака, следовательно, искомый корень уравнения $f(x) = 0$ находится внутри отрезка $[c, b]$, поэтому левый конец отрезка “переносится“ в его середину.

$$\text{sign}(f(a) \cdot f(c)) = \begin{cases} < 0, & b = c \\ > 0, & a = c \end{cases}$$

Таким образом, область поиска корня уравнения $f(x) = 0$ “сужается наполовину“.

4) Процесс вычислений (1)–(3) повторяется до тех пока, длина вновь полученного интервала $[a, b]$ станет меньше заранее заданного числа ε (погрешности поиска корня уравнения):

$$|a, b| < \varepsilon$$

В качестве корня уравнения x_0 приближенно принимаются середину последнего полученного интервала $[a, b]$.

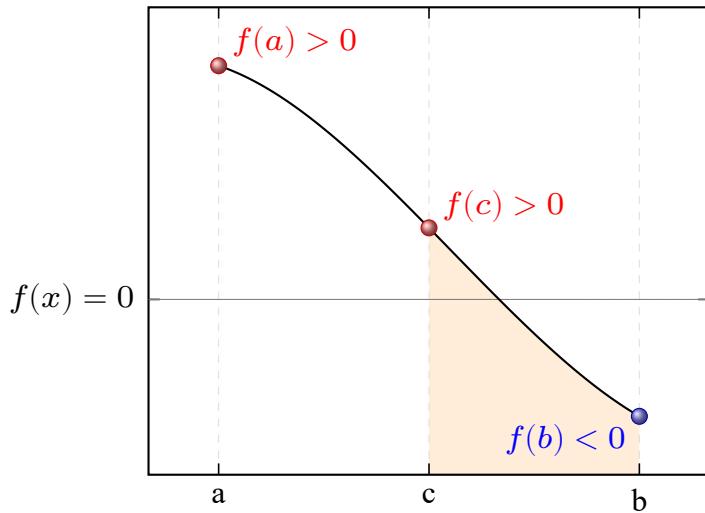


Рисунок 3 – Иллюстрация метода бисекции (деления отрезка пополам):
 $f(a) \cdot f(c) > 0$, поэтому новая область поиска корня отрезок $[c, b]$

Следует отметить, что если условие строгой монотонности для функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$ не выполняется и на этом отрезке имеется несколько корней, то указанный итерационный процесс сойдется к одному из корней, но *заранее неизвестно, к какому именно.*

1.3 Метод выделения корней

Один из недостатков интервального метода и метода бисекции является сходимость итерационного процесса к заранее неизвестному корню уравнения $f(x) = 0$. Этот недостаток можно устранить удалением уже найденного корня.

Если x_1 простой корень уравнения $f(x) = 0$ и функция $f(x)$ непрерывна по Липшицу, то вспомогательная функция

$$g(x) = \frac{f(x)}{(x - x_1)}$$

непрерывна, причем все нули функций $f(x)$ и $g(x)$ совпадают, за исключением x_1 , так как $g(x_1) \neq 0$.

Поэтому найденный корень x_1 можно удалить, т.е. перейти в процессе поиска корня уравнения $f(x) = 0$ от функции $f(x)$ к функции $g(x)$. Тогда процесс нахождения остальных корней уравнения сводится к нахождению корней $g(x) = 0$.

Когда найден какой-нибудь новый корень x_2 уравнения $g(x) = 0$, то этот

корень тоже можно удалить, вводя новую вспомогательную функцию:

$$\varphi(x) = \frac{g(x)}{(x - x_2)} = \frac{f(x)}{(x - x_1)(x - x_2)}$$

Таким образом, можно последовательно найти все корни исходного уравнения $f(x) = 0$.

В любом методе поиска корней уравнения $f(x)$ окончательные итерации вблизи определяемого корня рекомендуется делать не по функциям типа $g(x)$, а по исходной функции $f(x)$. Последние итерации, вычисленные по функции $g(x)$, используются при этом в качестве нулевого приближения.

1.4 Численное решение нелинейного уравнения методом бисекции

На отрезке $x \in [-3, 5]$ задана непрерывная функция:

$$f(x) = \tanh(x) \cdot (1 + \cos(x)) - \frac{1}{2}$$

С помощью метода бисекции найдем первый положительный корень $x_1 > 0$ нелинейного уравнения $f(x) = 0$.

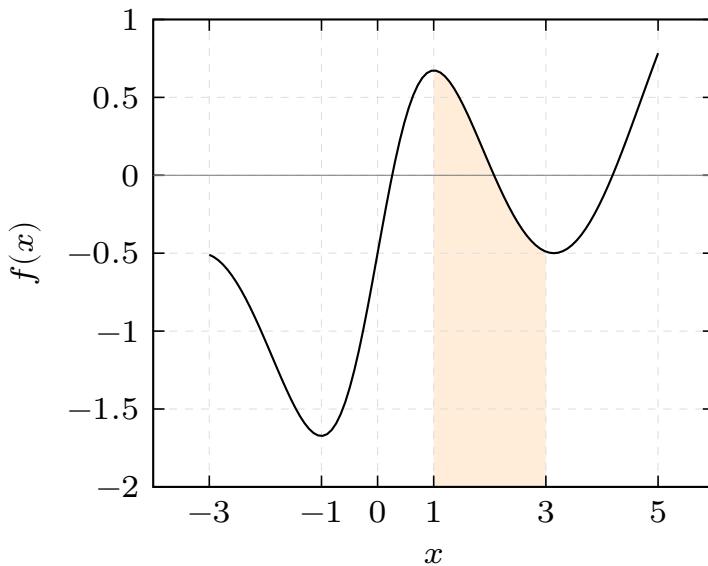


Рисунок 4 – График функции $f(x) = \tanh(x) \cdot (1 + \cos(x)) - \frac{1}{2}$

На основе анализа графика функции $f(x)$ (рисунок 4) выбираем область поиска первого положительного корня уравнения ($x > 0$), на границах которой функция $f(x)$ принимает значения разных знаков $f(a) \cdot f(b) < 0$ и в пределах

этого области строго монотонна $f'(x) < 0$.

Таким требованиям удовлетворяет отрезок $x \in [1, 3]$ (выделенная область на графике), так как функция на отрезке монотонна $f'(x) < 0$ и на концах отрезка принимает значения разных знаков:

$$f(1) = \tanh(1) \cdot (1 + \cos(1)) - \frac{1}{2} \approx 0.67 > 0$$

$$f(3) = \tanh(3) \cdot (1 + \cos(3)) - \frac{1}{2} \approx -0.49 < 0$$

Зададим погрешность поиска корня уравнения $\varepsilon = 0.1$ и используем метод бисекции для поиска первого положительного корня уравнения:

- 1) Область поиска корня уравнения отрезок $[1, 3]$ делится пополам и вычисляется значение функции в середине отрезка $f(c)$:

$$c = \frac{1+3}{2} = 2$$

$$f(c) = f(2) = \tanh(2) \cdot (1 + \cos(2)) - \frac{1}{2} \approx 0.06285 > 0$$

Проводится сравнение знаков функции в середине отрезка $f(c)$ и на левом конце отрезка $f(a)$:

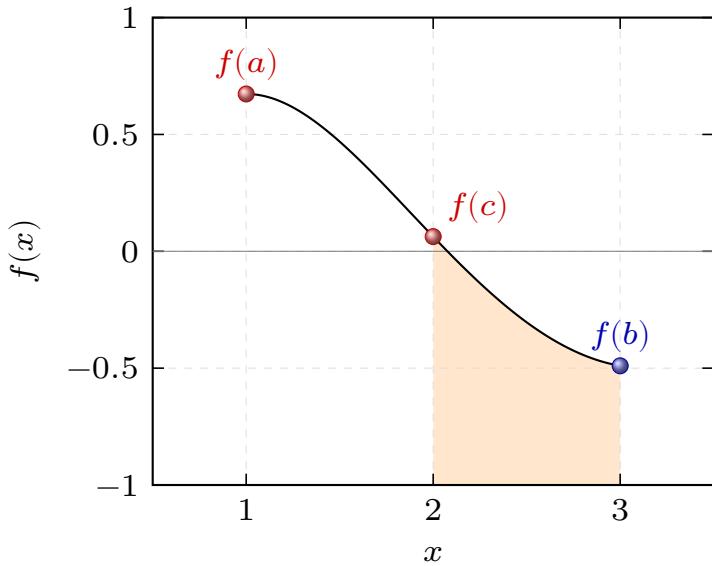
$$f(a) \cdot f(c) = f(1) \cdot f(2) = 0.67 \cdot 0.06285 = 0.0423 > 0$$

Следовательно, искомый корень уравнения находится внутри отрезка $[2, 3]$.

Проведем сравнение длины отрезка и погрешности поиска корня:

$$|a, b| = b - a = 3 - 2 = 1 > \varepsilon = 0.1$$

Так как длина отрезка больше погрешности поиска, то итерационный процесс продолжаем.



- 2) Область поиска корня уравнения отрезок $[2, 3]$ делится пополам и вычисляется значение функции в середине отрезка $f(c)$:

$$c = \frac{2+3}{2} = 2.5$$

$$f(c) = f(2.5) = \tanh(2.5) \cdot (1 + \cos(2.5)) - \frac{1}{2} \approx -0.3038 < 0$$

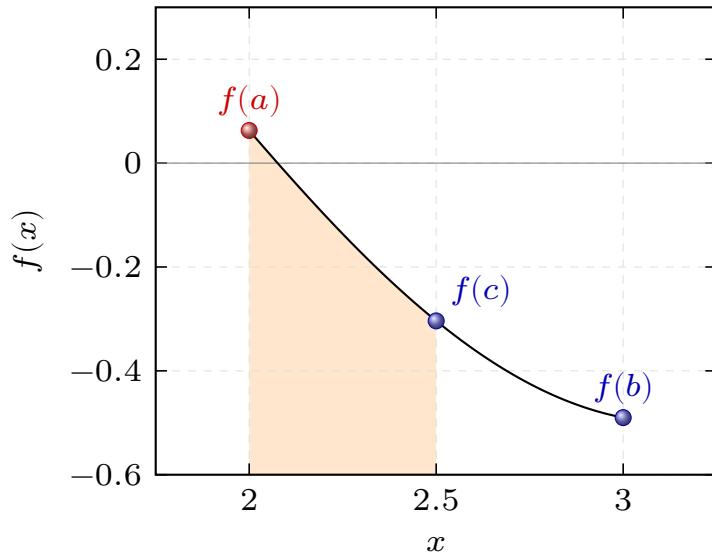
Проводится сравнение знаков функции в середине отрезка $f(c)$ и на левом конце отрезка $f(a)$:

$$f(a) \cdot f(c) = f(2) \cdot f(2.5) = 0.6285 \cdot (-0.3038) = -0.019094 < 0$$

Следовательно, искомый корень уравнения находится внутри отрезка $[2, 2.5]$. Проведем сравнение длины отрезка и погрешности поиска корня:

$$|a, b| = b - a = 2.5 - 2 = 0.5 > \varepsilon = 0.1$$

Так как длина отрезка больше погрешности поиска, то итерационный процесс продолжаем.



- 3) Область поиска корня уравнения отрезок $[2, 2.5]$ делится пополам и вычисляется значение функции в середине отрезка $f(c)$:

$$c = \frac{2 + 2.5}{2} = 2.25$$

$$f(c) = f(2.25) = \tanh(2.25) \cdot (1 + \cos(2.25)) - \frac{1}{2} \approx -0.13634 < 0$$

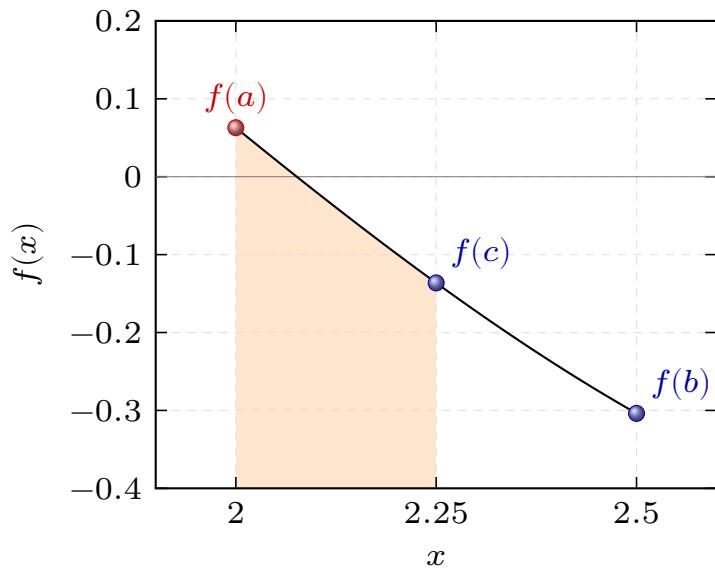
Проводится сравнение знаков функции в середине отрезка $f(c)$ и на левом конце отрезка $f(a)$:

$$f(a) \cdot f(c) = f(2) \cdot f(2.25) = 0.6285 \cdot (-0.13634) = -0.00857 < 0$$

Следовательно, искомый корень уравнения находится внутри отрезка $[2, 2.25]$. Проведем сравнение длины отрезка и погрешности поиска корня:

$$|a, b| = b - a = 2.25 - 2 = 0.25 > \varepsilon = 0.1$$

Длина отрезка меньше погрешности поиска, поэтому итерационный процесс продолжаем.



- 4) Область поиска корня уравнения отрезок $[2, 2.25]$ делится пополам и вычисляется значение функции в середине отрезка $f(c)$:

$$c = \frac{2 + 2.25}{2} = 2.125$$

$$f(c) = f(2.125) = \tanh(2.125) \cdot (1 + \cos(2.125)) - \frac{1}{2} \approx -0.03959 < 0$$

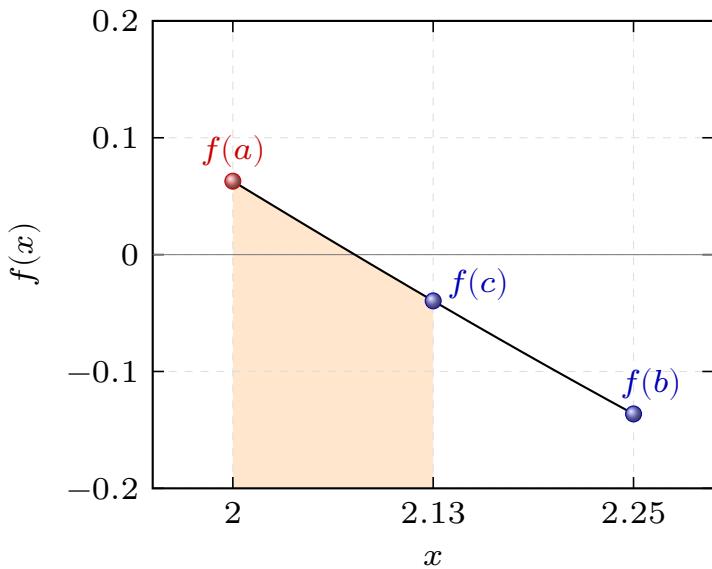
Проводится сравнение знаков функции в середине отрезка $f(c)$ и на левом конце отрезка $f(a)$:

$$f(a) \cdot f(c) = f(2) \cdot f(2.125) = 0.6285 \cdot (-0.03959) = -0.002488 < 0$$

Следовательно, искомый корень уравнения находится внутри отрезка $[2, 2.125]$. Проведем сравнение длины отрезка и погрешности поиска корня:

$$|a, b| = b - a = 2.125 - 2 = 0.125 > \varepsilon = 0.1$$

Длина отрезка меньше погрешности поиска, поэтому итерационный процесс продолжаем.



- 5) Область поиска корня уравнения отрезок $[2, 2.125]$ делится пополам и вычисляется значение функции в середине отрезка $f(c)$:

$$c = \frac{2 + 2.125}{2} = 2.0625$$

$$f(c) = f(2.0625) = \tanh(2.0625) \cdot (1 + \cos(2.0625)) - \frac{1}{2} \approx 0.01108 > 0$$

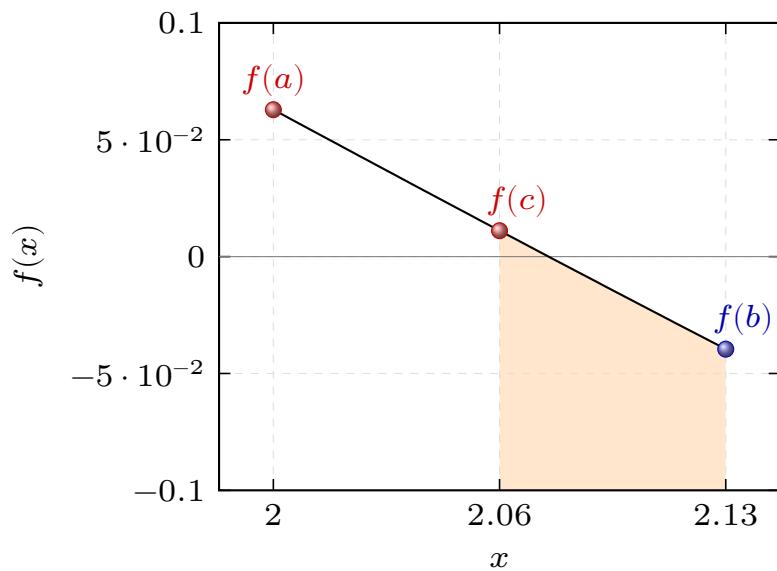
Проводится сравнение знаков функции в середине отрезка $f(c)$ и на левом конце отрезка $f(a)$:

$$f(a) \cdot f(c) = f(2) \cdot f(2.0625) = 0.6285 \cdot 0.01108 = 0.0007 > 0$$

Следовательно, искомый корень уравнения находится внутри отрезка $[2.0625, 2.125]$. Проведем сравнение длины отрезка и погрешности поиска корня:

$$|a, b| = b - a = 2.125 - 2.0625 = 0.0625 < \varepsilon = 0.1$$

Длина отрезка меньше погрешности поиска, поэтому итерационный процесс завершаем.



В качестве первого положительного корня x_1 уравнения $f(x) = 0$ приближенно выберем середину последнего полученного интервала $[a, b]$ и для контроля определим значение функции в точке $f(x_1)$ приближенного корня уравнения:

$$x_1 = \frac{a + b}{2} = \frac{2.0625 + 2.125}{2} = 2.09375$$

$$f(x_1) = f(2.09375) = \tanh(2.09375) \cdot (1 + \cos(2.09375)) - \frac{1}{2} \approx -0.01442$$

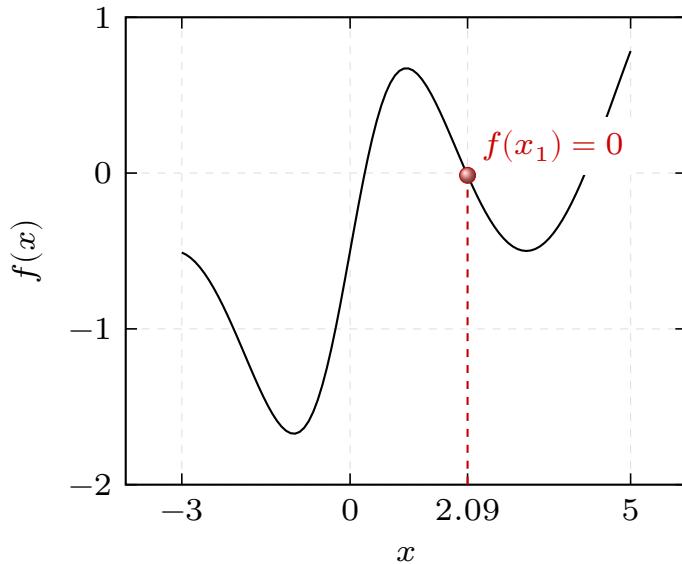


Рисунок 5 – График функции $f(x)$ (**сплошная линия**) и первый положительный корень $x_1 = 2.09375$ (маркер) уравнения $f(x) = 0$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Самарский А. А. Введение в численные методы. – Лань, 2009. –288 с.
- 2 Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: учебное пособие для вузов // М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1989. –432 с.
- 3 Самарский А. А. и др. Задачи и упражнения по численным методам: Учебное пособие // М.: Эдиториал УРСС, 2000. –208 с.
- 4 Калиткин Н. Н. Численные методы. 2 изд. –СПб.: БХВ-Петербург, 2011. –592 с.
- 5 Калиткин Н. Н. Численные методы: Учебное пособие. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. –511 с.
- 6 Демидович, Б.П. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова ; под ред. Б.П. Демидович. – Изд. 3-е, перераб. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы, 1967. –368 с.
- 7 [List of mathematical symbols by subject](#)