Доказательство гипотезы Римана о нетривиальных нулях дзета-функции

© Н. М. Мусин

02.12.2018

УДК 511

Аннотация

Доказывается гипотеза Римана о нетривиальных нулях дзета-функции.

Если некоторое комплексное число $s_0 = \sigma_0 + it_0$ является нетривиальным нулём, то (σ_0, t_0) является решением некоторой системы двух уравнений двух действительных переменных σ и t.

Изучение одного из двух уравнений показало, что его левая часть убывает (здесь были применены методы нестандартного (инфинитезимального) анализа), правая часть возрастает при фиксированном $t = t_0 > 0$ как функции переменной σ на множестве так называемых критических значений, значит, на «высоте» $t = t_0$ это решение единственно. Из свойства симметричности нетривиальных нулей относительно прямой $Re\, s = 1/2$ следует, что $\sigma_0 = 1/2$.

Ключевые слова: гипотеза Римана, дзета-функция, нетривиальные нули, инфинитезимальный анализ, нестандартный анализ.

Введение и постановка задачи

Пусть $s = \sigma + it$ – комплексная переменная, где $\sigma = \operatorname{Re} s, t = \operatorname{Im} s$.
$x \in \mathbb{R}$ - действительная переменная.

Известно [1], что при $\operatorname{Re} s > 0, s \neq 1$ дзета-функция Римана $\zeta(s)$ может быть представлена в виде

$$\zeta(s) = 1 + \frac{1}{s-1} - s \int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx \tag{1}$$

Здесь $\{x\}$ обозначает дробную часть числа x. Перепишем равенство 1 в виде

$$\zeta(s) = s \left(\frac{1}{s-1} - \int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx \right)$$

Тогда нахождение нетривиальных нулей функции $\zeta(s)$ сводится к решению уравнения

$$\int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx = \frac{1}{s-1} \tag{2}$$

Имеют место равенства

$$\frac{1}{x^{s+1}} = \frac{1}{x^{\sigma+1}} \left(\cos(t \ln x) - i \sin(t \ln x)\right),$$
$$\frac{1}{s-1} = \frac{\sigma-1}{(\sigma-1)^2+t^2} - i \frac{t}{(\sigma-1)^2+t^2}.$$

Поэтому уравнение 2 будет эквивалентно следующей системе:

$$\begin{cases} \int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \cos(t \ln x) dx = \frac{\sigma-1}{(\sigma-1)^2+t^2}, \\ \int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \sin(t \ln x) dx = \frac{t}{(\sigma-1)^2+t^2}. \end{cases} \tag{3}$$

Как известно, нули дзета-функции Римана симметричны относительно вещественной оси, поэтому достаточно рассмотреть случай $t > 0$.

В дальнейшем изложении всегда $0 < \sigma < 1$, $t > 0$. Кроме того, некоторый нетривиальный нуль $s_0 = \sigma_0 + it_0$ будет считаться фиксированным.

Гипотеза Римана утверждает, что выполняется равенство $\sigma_0 = 1/2$.

О левых и правых частях уравнений системы 3

Введем следующие 4 функции:

$$u_1(\sigma, t) = \int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \cos(t \ln x) dx,$$
$$v_1(\sigma, t) = \int\limits_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \sin(t \ln x) dx,$$
$$u_2(\sigma, t) = \frac{\sigma-1}{(\sigma-1)^2+t^2},$$
$$v_2(\sigma, t) = \frac{t}{(\sigma-1)^2+t^2}.$$

Таким образом, систему 3 можно записать в виде

$$\begin{cases} u_1(\sigma, t) = u_2(\sigma, t), \\ v_1(\sigma, t) = v_2(\sigma, t). \end{cases} \tag{4}$$

Если $s_0 = \sigma_0 + it_0$ - нетривиальный нуль дзета-функции, то (σ_0, t_0) является решением системы 4 и, в частности, уравнения $v_1(\sigma, t) = v_2(\sigma, t)$; в дальнейшем изложении фиксируем значение $t = t_0 > 0$. Далее изучаем поведение левой и правой частей именно этого уравнения. Изучение другого уравнения этой системы логической необходимости для доказательства гипотезы не имеет.

Лемма 1. *Функция $w = v_2(\sigma, t_0)$ при фиксированном $t_0 > 0$ возрастает как функция от переменной σ.*

Доказательство. Справедливость леммы следует из неравенства

$$\frac{dv_2}{d\sigma} = -\frac{2(\sigma-1)t_0}{(t_0^2 + (\sigma-1)^2)^2} > 0$$

□

Из леммы 1 следует, что все значения функции $w = v_2(\sigma, t_0)$ при $\sigma \in (0; 1)$ принадлежат интервалу $(t_0/(1+t_0^2), 1/t_0)$.

Другими словами, график функции $w = v_2(\sigma, t_0)$ целиком лежит в прямоугольнике $0 < \sigma < 1,\ t_0/(1+t_0^2) < w < 1/t_0$. Далее нас интересует часть графика функции $v_1(\sigma, t_0)$, лежащая в этом прямоугольнике.

Определение 1. *Прямоугольник $0 < \sigma < 1,\ t_0/(1+t_0^2) < w < 1/t_0$ будем называть критическим прямоугольником.*

Определение 2. *Значение переменной σ, при котором соответствующая точка $(\sigma, v_1(\sigma, t_0))$ графика функции $v_1(\sigma, t_0)$ находится в критическом прямоугольнике, будем называть критическим значением.*

Таким образом, значение σ_0 является критическим значением переменной σ, т.к. точка $(\sigma_0, v_1(\sigma_0, t_0))$ находится в критическом прямоугольнике; в то же время это точка пересечения графиков функций $v_1(\sigma, t_0)$ и $v_2(\sigma, t_0)$.

Функция $\sin(t_0 \ln x)$ обращается в нуль в точках $x_k = e^{\pi k/t_0}$, где $k \in \mathbb{Z}$. Более того, так как изначально $x \geqslant 1$, то из неравенства $t_0 \ln x \geqslant 0$ и равенства $t_0 \ln x = \pi k$ следует, что $k \geqslant 0$.

Ясно, что $x_0 = 1$.

Число k будем называть номером интервала (x_k, x_{k+1}). На каждом из таких интервалов функция $\sin(t_0 \ln x)$ имеет один и тот же постоянный знак. Очевидно, на интервале с номером $k = 0$ этот знак положительный, далее при переходе с одного интервала на соседний знаки чередуются.

Интервалы с чётными номерами будем называть *положительными*, а интервалы с нечётными номерами назовём *отрицательными.*

В дальнейшем фиксируем произвольное значение $\sigma \in (0, 1)$.

Обозначим

$$\Psi(\sigma, x) = \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \sin(t_0 \ln x).$$

Функция $\Psi(\sigma, x)$ на интервале с любым номером обращается в нуль на конечном множестве попадающих в интервал натуральных чисел (из-за множителя $\{x\}$), в остальных точках имеет тот же знак, что и $\sin(t_0 \ln x)$.

Получается знакочередующийся ряд

$$v_1(\sigma, t_0) = \sum_{k=0}^{\infty} \int\limits_{x_k}^{x_{k+1}} \Psi(\sigma, x) dx.$$

Обозначим

$$a_k = \int\limits_{x_k}^{x_{k+1}} \Psi(\sigma, x) dx.$$

Лемма 2. *Функция $v_1(\sigma, t_0)$ при фиксированном $t_0 > 0$ убывает на множестве критических значений переменной σ.*

Доказательство. Пусть σ' - некоторое положительное число такое, что $\sigma + \sigma'$ - критическое значение. Надо показать, что $v_1(\sigma, t_0) - v_1(\sigma + \sigma', t_0) > 0$.

Очевидно, что

$$\Psi(\sigma + \sigma', x) = \frac{1}{x^{\sigma'}} \Psi(\sigma, x).$$

Применив первую теорему о среднем, получаем для некоторого $c_k \in (x_k, x_{k+1})$

$$\int\limits_{x_k}^{x_{k+1}} \frac{1}{x^{\sigma'}} \Psi(\sigma, x) dx = \frac{1}{c_k^{\sigma'}} \int\limits_{x_k}^{x_{k+1}} \Psi(\sigma, x) dx.$$

Получается

$$v_1(\sigma, t_0) - v_1(\sigma + \sigma', t_0) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k a_k, \text{ где } \beta_k = 1 - \frac{1}{c_k^{\sigma'}} > 0.$$

Имеют место пределы

$$\lim_{\sigma' \to 0} \beta_k = 0, k = 0, 1, 2, \ldots.$$

Так как $c_0 < c_1 < c_2 < \ldots$, то $\beta_0 > \beta_1 > \beta_2 > \ldots$.

Пусть

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \min \left\{ \frac{1}{t_0} - v_1(\sigma, t_0),\ v_1(\sigma, t_0) - \frac{t_0}{1 + t_0^2} \right\}$$

Обозначим интервал $\Delta = (v_1(\sigma, t_0) - \varepsilon_0,\ v_1(\sigma, t_0) + \varepsilon_0)$.

Найдётся такой номер n_0, что для любого $m = 0, 1, 2, \ldots$ имеет место включение

$$\sum_{i=0}^{n_0+m} a_i \in \Delta.$$

Методом математической индукции легко показать, что для любого $m = 0, 1, 2, \dots$ найдётся положительное число $\varepsilon < \varepsilon_0$ и $\varepsilon < \beta_i,\ i = 0, 1, \dots, n_0 + m$, что

$$\sum_{i=0}^{n_0+m} \varepsilon a_i \in \Delta.$$

Воспользуемся методами нестандартного (инфинитезимального) анализа (см., например, [2]).

Если переписать включение в виде логической формулы, то можно убедиться, что её схема (полная педантично выписанная формула заняла бы много места, ничего не добавляя по сути) будет иметь вид

$$(\forall \sigma' > 0)(\forall m = 0, 1, 2, \dots)(\exists \varepsilon < \varepsilon_0 \wedge \varepsilon < \beta_i, i = 0, 1, \dots, n_0 + m) P(\dots)$$

и в ней не будет параметров, так как $n_0, \sigma, t_0, \varepsilon_0$ - логические константы. Поэтому по принципу переноса можно сделать вывод, что включение имеет место и для всех бесконечно больших гипердействительных чисел m и положительного бесконечно малого ε, причём

$$v_1(\sigma, t_0) - v_1(\sigma + \sigma', t_0) \approx \sum_{i=0}^{M} \varepsilon a_i \text{ где } M = n_0 + m \text{ тоже бесконечно большое число.}$$

Но

$$\sum_{i=0}^{M} \varepsilon a_i = \varepsilon \sum_{i=0}^{M} a_i \text{ и } \sum_{i=0}^{M} a_i \in \Delta, \text{ значит, } v_1(\sigma, t_0) - v_1(\sigma + \sigma', t_0) > 0.$$

Лемма 2 доказана. □

Доказательство гипотезы Римана

Теорема. *Если дзета-функция Римана при фиксированном $t = t_0 > 0$ имеет решение $s_0 = \sigma_0 + it_0$, то $\sigma_0 = 1/2$.*

Доказательство. Нетривиальный нуль дзета-функции является решением уравнения 2, значит, пара (σ_0, t_0) удовлетворяет системе 4 и, в частности, второму уравнению этой системы.

Из лемм 1 и 2 следует, что эта пара единственная. Если при этом $\sigma_0 \neq 1/2$, то из свойства симметричности решений относительно прямой $\sigma = 1/2$ следует, что имеется и второе решение $1 - \sigma_0 + it_0$, и пара $(1 - \sigma_0, t_0)$ тоже удовлетворяет второму уравнению системы. Получается противоречие, следовательно, $\sigma_0 = 1/2$. □

Гипотеза Римана доказана.

Список литературы

[1] Галочкин А.И., Нестеренко Ю.В., Шидловский А.Б. *Введение в теорию чисел.* Изд-во Московского университета,1984)

[2] R. Goldblatt, *Lectures on the hyperreals: an introduction to nonstandard analysis, New York : Springer, 1998.*