

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 00. Выпуск 00.

УДК 511

DOI 10.22405/2226-8383-2018-00-00-1-12

Доказательство гипотезы Римана о нетривиальных нулях дзета-функции¹

Н. М. Мусин Пенсионер

e-mail: nail.musin2009@yandex.ru

Аннотация

В статье доказывается гипотеза Римана о нетривиальных нулях дзета-функции.

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

Изучение одного из этих двух уравнений показало, что оно имеет единственное решение при $t = t_0$.

Из свойства симметричности нетривиальных нулей относительно прямой $\sigma = \frac{1}{2}$ следует, что $\sigma_0 = \frac{1}{2}$.

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

Библиография: 4 названия.

Для цитирования:

Н. М. Мусин. Доказательство гипотезы Римана о нетривиальных нулях дзета-функции // Чебышевский сборник, 2023, т. 00, вып. 00, с. 1–12.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 00. No. 00.

UDC 511

DOI 10.22405/2226-8383-2018-00-00-1-12

Proof of the Riemann hypothesis on nontrivial zeros of the zeta function

N. M. Musin Retiree

e-mail: nail.musin2009@yandex.ru

Abstract

In paper the Riemann hypothesis on nontrivial zeros of the zeta function is proved.

If a complex number $s_0 = \sigma_0 + it_0$ is a nontrivial zero, then the pair (σ_0, t_0) is a solution to a system of two equations of two real variables σ and t .

Considering one of that two equations one can found that it has a unique solution at $t = t_0$.

As nontrivial zeros are symmetric about the line $\sigma = \frac{1}{2}$ it follows that $\sigma_0 = \frac{1}{2}$.

Keywords: the Riemann hypothesis, zeta function, nontrivial zeros.

Bibliography: 4 titles.

For citation:

N. M. Musin, 2023, "Proof of the Riemann hypothesis on nontrivial zeros of the zeta function", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 00, no. 00, pp. 1–12.

¹Работа выполнена без какой-либо финансовой поддержки.

1. Введение и постановка задачи

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

Известно [1, с. 40], что при $\sigma > 0$ дзета-функция Римана $\zeta(s)$ может быть представлена в виде

$$\zeta(s) = 1 + \frac{1}{s-1} - s \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx. \quad (1)$$

Вывод формулы (1) имеется также в [2].

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

$$\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx = \frac{1}{s-1}. \quad (2)$$

Имеют место равенства

$$\begin{aligned} \frac{1}{x^{s+1}} &= \frac{1}{x^{\sigma+1}} (\cos(t \ln x) - i \sin(t \ln x)), \\ \frac{1}{s-1} &= \frac{\sigma-1}{(\sigma-1)^2 + t^2} - i \frac{t}{(\sigma-1)^2 + t^2}. \end{aligned}$$

Поэтому уравнение (2) будет эквивалентно следующей системе:

$$\begin{cases} \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \cos(t \ln x) dx = \frac{\sigma-1}{(\sigma-1)^2 + t^2}, \\ \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \sin(t \ln x) dx = \frac{t}{(\sigma-1)^2 + t^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Как известно, нули дзета-функции Римана симметричны относительно действительной оси σ , 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 $\sigma_0 = \frac{1}{2}$.

2. О левых и правых частях уравнений системы (3)

Введем следующие 4 функции:

$$\begin{aligned} u_1(\sigma, t) &= \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \cos(t \ln x) dx, \\ v_1(\sigma, t) &= \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} \sin(t \ln x) dx, \\ u_2(\sigma, t) &= \frac{\sigma-1}{(\sigma-1)^2 + t^2}, \\ v_2(\sigma, t) &= \frac{t}{(\sigma-1)^2 + t^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, систему (3) можно записать в виде

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

Если $s_0 = \sigma_0 + it_0$ - нетривиальный нуль дзета-функции, то пара (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 обеих частей именно этого уравнения как функции переменной σ ; будет показано, что графики обеих частей должны пересекаться только в одной точке с абсциссой σ_0 , и из этого получается противоречие предположению о том, что $\sigma_0 \neq \frac{1}{2}$, поэтому изучение другого уравнения этой системы логической необходимости для доказательства гипотезы не имеет (выбор уравнения решался путём подбрасывания монеты (шутка); при желании доказательство можно проводить, изучая только уравнение $u_1(\sigma, t) = u_2(\sigma, t)$, схема та же самая)

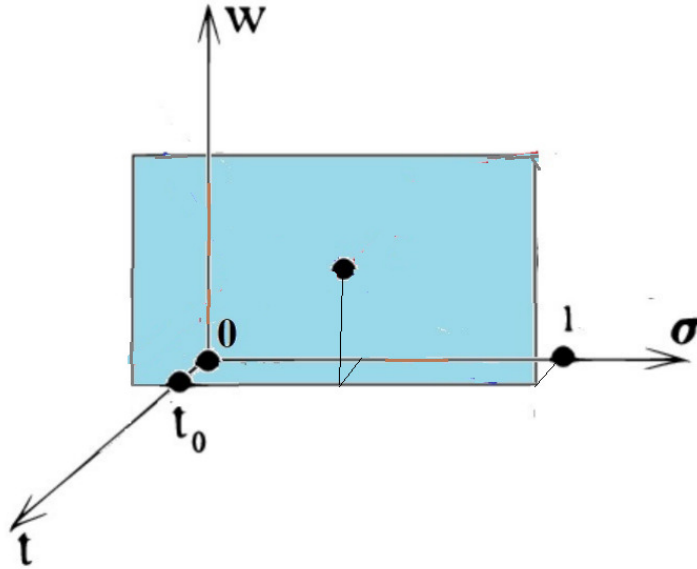


Рис. 1: Плоскость $t = t_0$

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

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

□

СЛЕДСТВИЕ 1. *Из леммы 1 следует, что все значения функции $w = v_2(\sigma, t_0)$ при $\sigma \in (0; 1)$ принадлежат интервалу $U = \left(\frac{t_0}{1 + t_0^2}, \frac{1}{t_0} \right)$.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. *Прямоугольник $\left\{ (\sigma, w) \mid \sigma \in (0; 1), w \in U \right\}$ будем называть критическим прямоугольником.*

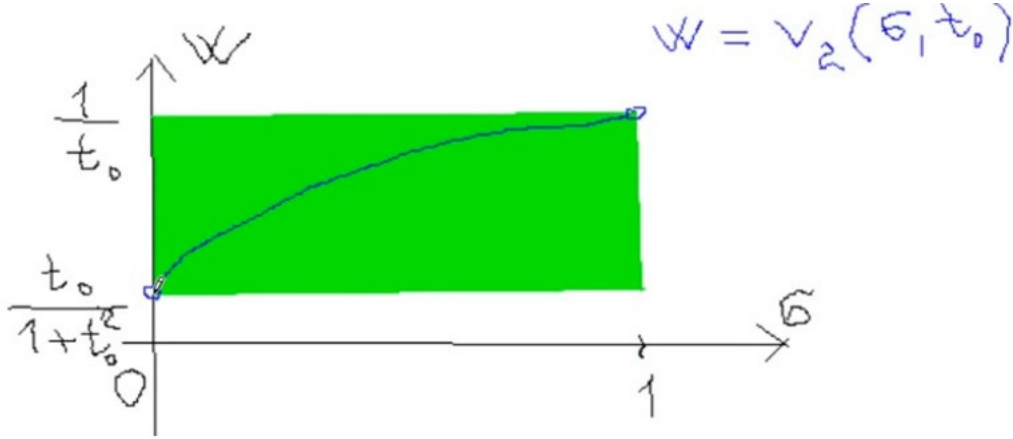


Рис. 2: Критический прямоугольник

Далее нас интересует часть графика функции $v_1(\sigma, t_0)$, лежащая в этом прямоугольнике.

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 как точка пересечения графиков функций $v_1(\sigma, t_0)$ и $v_2(\sigma, t_0)$.

ЗАМЕЧАНИЕ 1. Критические прямоугольники очень тонкие, их ширина равна $\frac{1}{t_0} - \frac{t_0}{1+t_0^2} = \frac{1}{(1+t_0^2)t_0}$. Уже для нетривиального нуля с самой маленькой положительной мнимой частью $t_0 = 14.134725141\dots$ получается ширина $0.0003523461812\dots$

Если σ - критическое значение, то, согласно определению, $v_1(\sigma, t_0) \in \left(\frac{t_0}{1+t_0^2}, \frac{1}{t_0}\right)$; в частности, $v_1(\sigma, t_0) > 0$.

Обозначим $\mathfrak{R}[a, b]$ множество всех функций, интегрируемых по Риману на отрезке $[a, b]$.

Нам будет полезно следствие из следующей теоремы [3, с. 347]:

ТЕОРЕМА (первая теорема о среднем для интеграла). Пусть $f, g \in \mathfrak{R}[a, b]$, $m = \inf_{x \in [a, b]} f(x)$, $M = \sup_{x \in [a, b]} f(x)$. Если функция g неотрицательна (или неположительна) на отрезке $[a, b]$, то

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = \mu \int_a^b g(x)dx, \text{ где } \mu \in [m, M].$$

СЛЕДСТВИЕ 2. Пусть условия теоремы о среднем выполняются для любого

$b \in [a, +\infty)$ и существует такое действительное B , что $\int_a^b g(x)dx > 0$ при всех $b > B$, пусть

существуют несобственные интегралы $\int_a^{+\infty} f(x)g(x)dx$ и $\int_a^{+\infty} g(x)dx$, тогда

$$\int_a^{+\infty} f(x)g(x)dx = \alpha \int_a^{+\infty} g(x)dx, \text{ где } \alpha \in [m, M].$$

Доказательство. Согласно теореме о среднем

$$\frac{\int_a^b f(x)g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx} = \mu(b) \text{ при } b > B, \text{ где } \mu(b) \in [m, M].$$

Так как несобственные интегралы существуют, то при $b \rightarrow +\infty$ существует предел левой части, а значит, существует и $\alpha = \lim_{b \rightarrow +\infty} \mu(b)$. Так как $\mu(b) \in [m, M]$, то и $\alpha \in [m, M]$. $\square$

ЛЕММА 2.

$$\int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} \sin(t_0 \ln x) dx = \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} \quad (5)$$

Доказательство. Обозначим $F(x)$ первообразную функции $\frac{1}{x^{\sigma+1}} \sin(t_0 \ln x)$.

$$\begin{aligned} F(x) &= \int \frac{1}{x^{\sigma+1}} \sin(t_0 \ln x) dx = \int \sin(t_0 \ln x) e^{-\sigma \ln x} d \ln x = |u = \ln x| = \int \sin(t_0 u) e^{-\sigma u} du = \\ &= -\frac{1}{\sigma} \int \sin(t_0 u) d e^{-\sigma u} = -\frac{1}{\sigma} \left(\sin(t_0 u) e^{-\sigma u} - \int e^{-\sigma u} d \sin(t_0 u) \right) = -\frac{1}{\sigma} \sin(t_0 u) e^{-\sigma u} + \\ &+ \frac{t_0}{\sigma} \int e^{-\sigma u} \cos(t_0 u) du = -\frac{1}{\sigma} \sin(t_0 u) e^{-\sigma u} + \frac{t_0}{\sigma} \int -\frac{1}{\sigma} \cos(t_0 u) d e^{-\sigma u} = -\frac{1}{\sigma} \sin(t_0 u) e^{-\sigma u} - \\ &- \frac{t_0}{\sigma^2} \left(\cos(t_0 u) e^{-\sigma u} - \int e^{-\sigma u} d \cos(t_0 u) \right) = -\frac{1}{\sigma} \sin(t_0 u) e^{-\sigma u} - \frac{t_0}{\sigma^2} \cos(t_0 u) e^{-\sigma u} - \\ &- \frac{t_0^2}{\sigma^2} \int \sin(t_0 u) e^{-\sigma u} du = -\frac{1}{\sigma} \sin(t_0 \ln x) e^{-\sigma \ln x} - \frac{t_0}{\sigma^2} \cos(t_0 \ln x) e^{-\sigma \ln x} - \\ &- \frac{t_0^2}{\sigma^2} \int \sin(t_0 \ln x) e^{-\sigma \ln x} d \ln x = -\frac{1}{\sigma} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0}{\sigma^2} \frac{\cos(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0^2}{\sigma^2} \int \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx = \\ &- \frac{1}{\sigma} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0}{\sigma^2} \frac{\cos(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0^2}{\sigma^2} F(x). \end{aligned}$$

Получили равенство $F(x) = -\frac{1}{\sigma} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0}{\sigma^2} \frac{\cos(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0^2}{\sigma^2} F(x)$, следовательно,

$$F(x) + \frac{t_0^2}{\sigma^2} F(x) = -\frac{1}{\sigma} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0}{\sigma^2} \frac{\cos(t_0 \ln x)}{x^\sigma}.$$

$$\text{Итак, } \frac{t_0^2 + \sigma^2}{\sigma^2} F(x) = -\frac{1}{\sigma} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^\sigma} - \frac{t_0}{\sigma^2} \frac{\cos(t_0 \ln x)}{x^\sigma}.$$

Далее,

$$\left. \frac{t_0^2 + \sigma^2}{\sigma^2} F(x) \right|_1^{+\infty} = -\left. \frac{1}{\sigma} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^\sigma} \right|_1^{+\infty} - \left. \frac{t_0}{\sigma^2} \frac{\cos(t_0 \ln x)}{x^\sigma} \right|_1^{+\infty} = \frac{t_0}{\sigma^2},$$

отсюда следует, что

$$\int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} \sin(t_0 \ln x) dx = F(x) \Big|_1^{+\infty} = \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2}.$$

$\square$

ЗАМЕЧАНИЕ 2. Если бы мы вместо равенства $v_1(\sigma, t) = v_2(\sigma, t)$ системы (4) выбрали равенство $u_1(\sigma, t) = u_2(\sigma, t)$, то нам пришлось бы доказывать равенство

$$\int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} \cos(t_0 \ln x) dx = \frac{\sigma}{\sigma^2 + t_0^2}.$$

Построим функцию

$$\hat{v}_1(\sigma, t) = \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} \sin(t \ln x) dx.$$

Лемма 2 означает, что

$$\hat{v}_1(\sigma, t_0) = \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2}.$$

Графики функций $\hat{v}_1(\sigma, t_0)$ и $v_2(\sigma, t_0)$ расположены целиком в критическом прямоугольнике и симметричны в нём друг другу относительно прямой $\sigma = \frac{1}{2}$, пересекаясь в точке с абсциссой $\frac{1}{2}$.

В самом деле, функция $\hat{v}_1(\sigma, t_0)$ убывает на $[0; 1]$ от $\frac{1}{t_0}$ до $\frac{1}{1+t_0^2}$, функция $v_2(\sigma, t_0)$ возрастает на $[0; 1]$ от $\frac{1}{1+t_0^2}$ до $\frac{1}{t_0}$, при этом $\hat{v}_1(\sigma, t_0) = \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} = \frac{t_0}{(1 - (1 - \sigma))^2 + t_0^2} = v_2(1 - \sigma, t_0)$. Равенство $\hat{v}_1(\sigma, t_0) = v_2(\sigma, t_0)$ означает то же самое, что и $\frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} = \frac{t_0}{(1 - \sigma)^2 + t_0^2}$, откуда следует $\sigma = \frac{1}{2}$.

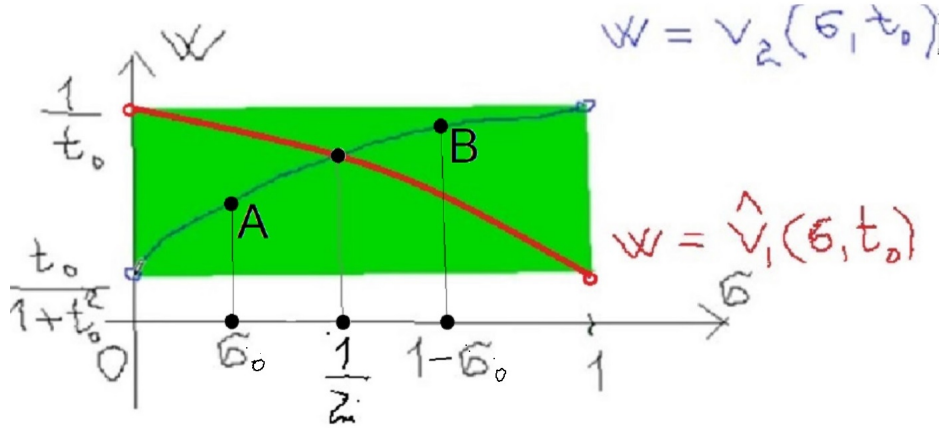


Рис. 3: Пересечение графиков $\hat{v}_1$ и v_2

Доказательство гипотезы Римана

ТЕОРЕМА. Если дзета-функция Римана имеет нетривиальный нуль $s_0 = \sigma_0 + it_0$, где $t_0 > 0$, то $\sigma_0 = \frac{1}{2}$.

Доказательство. Как известно, в комплексной плоскости (σ, t) , если точка $s_0 = \sigma_0 + it_0$ - нетривиальный нуль дзета-функции, то точка $1 - \sigma_0 + it_0$, то есть симметричная ей относительно прямой $\sigma = \frac{1}{2}$, тоже является нетривиальным нулём дзета-функции.

То есть, если пара (σ_0, t_0) является решением уравнения $v_1(\sigma, t) = v_2(\sigma, t)$, то пара $(1 - \sigma_0, t_0)$ тоже будет решением этого же уравнения.

При этом точка $A(\sigma_0, v_2(\sigma_0, t_0))$ имеет ординату $v_2(\sigma_0, t_0) = \frac{t_0}{(1 - \sigma_0)^2 + t_0^2}$, а точка $B(1 - \sigma_0, v_2(1 - \sigma_0, t_0))$ имеет ординату $v_2(1 - \sigma_0, t_0) = \frac{t_0}{\sigma_0^2 + t_0^2}$.

Допустим, что $\sigma_0 \neq \frac{1}{2}$. Полагаем для определённости, что $\sigma_0 < \frac{1}{2}$. Тогда точка A лежит ниже графика функции $\hat{v}_1(\sigma, t_0)$, а точка B - выше.

Таким образом, график функции v_1 , согласно нашему предположению о том, что σ_0 является решением уравнения $v_1(\sigma, t_0) = v_2(\sigma, t_0)$, проходит через точку A , и теперь предстоит выяснить, пройдёт ли он и через точку B .

Согласно следствию из первой теоремы о среднем для интеграла, для каждого $\sigma > 0$ и, тем более, для каждого $\sigma \in (0; 1)$ найдутся такие $\alpha(\sigma), \beta(\sigma) \in [0; 1]$, что

$$\begin{aligned} \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} (1 + \sin(t_0 \ln x)) dx &= \alpha(\sigma) \int_1^{+\infty} \frac{1 + \sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx = \alpha(\sigma) \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} dx + \alpha(\sigma) \int_1^{+\infty} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx = \\ &= \alpha(\sigma) \frac{1}{\sigma} + \alpha(\sigma) \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} (1 + \sin(t_0 \ln x)) dx = \beta(\sigma) \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} dx + \int_1^{+\infty} \{x\} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx = \beta(\sigma) \frac{1}{\sigma} + \int_1^{+\infty} \{x\} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx. \quad (7)$$

Приравнявая правые части равенств 6 и 7, получаем

$$\alpha(\sigma) \frac{1}{\sigma} + \alpha(\sigma) \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} = \beta(\sigma) \frac{1}{\sigma} + \int_1^{+\infty} \{x\} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx,$$

отсюда получаем

$$\int_1^{+\infty} \{x\} \frac{\sin(t_0 \ln x)}{x^{\sigma+1}} dx = (\alpha(\sigma) - \beta(\sigma)) \frac{1}{\sigma} + \alpha(\sigma) \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2}.$$

Таким образом,

$$v_1(\sigma, t_0) = (\alpha(\sigma) - \beta(\sigma)) \frac{1}{\sigma} + \alpha(\sigma) \hat{v}_1(\sigma, t_0). \quad (8)$$

Рассмотрим сначала три случая, когда функция $\alpha - \beta$ переменной σ сохраняет знак или нулевое значение на $(0; 1)$.

1. $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma) < 0$ на $(0; 1)$.

Из равенства (8) следует, что $v_1(\sigma, t_0) < \alpha(\sigma) \hat{v}_1(\sigma, t_0) \leq \hat{v}_1(\sigma, t_0)$ при всех $\sigma \in (0; 1)$.

2. $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma) = 0$ на $(0; 1)$.

Из равенства (8) следует, что $v_1(\sigma, t_0) = \alpha(\sigma)\hat{v}_1(\sigma, t_0) \leq \hat{v}_1(\sigma, t_0)$ при всех $\sigma \in (0; 1)$. При $\alpha(\sigma) < 1$ точка $v_1(\sigma, t_0)$ лежит ниже точки $\hat{v}_1(\sigma, t_0)$. При $\alpha(\sigma) = 1$ должно выполняться и равенство $\beta(\sigma) = 1$. Но ведь тогда из равенства $\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} dx = \beta(\sigma) \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} dx$ получается равенство $\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} dx = \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} dx$, которое не выполняется. Значит, равенство $\alpha(\sigma) = 1$ не достигается, поэтому $\alpha(\sigma) < 1$.

В случаях 1 и 2 график функции v_1 лежит ниже графика функции $\hat{v}_1$, но тогда и точки A и B лежали бы ниже графика функции $\hat{v}_1$, но, как было указано ранее, они должны лежать по разные стороны от этого графика.

Следовательно, если график функции v_1 проходит через точку A , то через точку B уже не пройдёт, и её абсцисса σ_0 не может быть решением уравнения $v_1(\sigma, t_0) = v_2(\sigma, t_0)$.

3. $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma) > 0$ на $(0; 1)$.

Обозначим $\delta(\sigma) = \alpha(\sigma) - \beta(\sigma)$.

$$\begin{aligned} \text{В этом случае } v_1(\sigma, t_0) &= \delta(\sigma) \frac{1}{\sigma} + \alpha(\sigma) \hat{v}_1(\sigma, t_0) > \delta(\sigma) \frac{1}{\sigma} + \delta(\sigma) \hat{v}_1(\sigma, t_0) = \\ &= \delta(\sigma) \left(\frac{1}{\sigma} + \hat{v}_1(\sigma, t_0) \right). \end{aligned}$$

Значит, график функции v_1 лежит выше графика функции $\gamma = \delta(\sigma) \left(\frac{1}{\sigma} + \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} \right)$.

Изучим взаимное расположение графиков γ и $\hat{v}_1$.

Для произвольного $\sigma \in (0; 1)$ построим выражение $\delta(\sigma) \left(\frac{1}{\sigma} + \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} \right) - \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2}$. После преобразований получаем дробь с положительным знаменателем $\sigma(\sigma^2 + t_0^2)$ и с выражением $\delta(\sigma)\sigma^2 - t_0(1 - \delta(\sigma))\sigma + \delta(\sigma)t_0^2$ в числителе.

Для указанного $\sigma \in (0; 1)$ построим квадратный трёхчлен $P_\sigma(x) = \delta(\sigma)x^2 - t_0(1 - \delta(\sigma))x + \delta(\sigma)t_0^2$. Мы как бы «заморозим» коэффициент $\delta(\sigma)$ для данного σ . Затем изучим поведение трёхчлена и подставим в него значение $x = \sigma$.

$$\text{Вычислим дискриминант } -3t_0^2 \left(\delta(\sigma) - \frac{1}{3} \right) (\delta(\sigma) + 1).$$

Хотя коэффициент $\delta(\sigma)$ определяется по σ однозначно и в трёхчлене $P_\sigma(x)$ он постоянен, мы его точное выражение по формулам (6) и (7) использовать не сможем, поэтому нам придётся «перебирать» возможные варианты его значений из интервала $(0; 1)$.

В нашем случае коэффициент $\delta(\sigma)$ положителен, поэтому вариант $\delta(\sigma) = -1$ отпадает - он относится к случаю 1.

$$\text{При } \delta(\sigma) = \frac{1}{3} \text{ у трёхчлена } P_\sigma(x) \text{ единственный корень } x_0 = \frac{t_0 \left(1 - \frac{1}{3} \right)}{2 \cdot \frac{1}{3}} = t_0 \text{ и на лу-}$$

че $(-\infty, t_0)$ он положителен. Так как у нетривиальных нулей наименьшая положительная мнимая часть равна $t_0 = 14.134725141\dots$, то $(0; 1) \subset (-\infty, t_0)$, следовательно, трёхчлен $P_\sigma(x)$ положителен на $(0; 1)$ и, в частности, на нашем σ . Это означает, что точка с абсциссой σ на графике γ лежит выше точки с такой же абсциссой на графике $\hat{v}_1$.

При значениях $\delta(\sigma) \in \left(\frac{1}{3}; 1 \right)$ трёхчлен $P_\sigma(x)$ не имеет корней, коэффициент при x^2 положителен, поэтому $P_\sigma(x) > 0$ на всей числовой прямой и, в частности, на нашем σ , что нас вполне устраивает.

Перейдём к значениям $\delta(\sigma) \in \left(0; \frac{1}{3}\right)$.

Корни квадратного трехчлена P_σ находим по формуле $x_{1,2} = t_0 \frac{1 - \delta(\sigma) \pm \sqrt{(1 - 3\delta(\sigma))(\delta(\sigma) + 1)}}{2\delta(\sigma)}$.

Сравним 1 и корни, проведя необходимые преобразования. Для удобочитаемости обозначим $\delta(\sigma)$ просто δ .

Составим разность $1 - x_1 = 1 - t_0 \frac{1 - \delta - \sqrt{(1 - 3\delta)(\delta + 1)}}{2\delta} = \frac{2\delta - t_0(1 - \delta - \sqrt{(1 - 3\delta)(\delta + 1)})}{2\delta}$.

Предположим, что разность $1 - x_1$ отрицательна и проведём эквивалентные преобразования числителя получающейся дроби:

$$\begin{aligned} 2\delta < t_0 - \delta t_0 - t_0 \sqrt{(1 - 3\delta)(\delta + 1)} &\Leftrightarrow t_0 \sqrt{(1 - 3\delta)(\delta + 1)} < t_0 - \delta t_0 - 2\delta \Leftrightarrow \\ -3\delta^2 t_0^2 - 2\delta t_0^2 + t_0^2 &< t_0^2 + \delta^2 t_0^2 + 4\delta^2 - 2\delta t_0^2 - 4\delta t_0 + 4\delta^2 t_0 \Leftrightarrow \\ -3\delta^2 t_0^2 - 2\delta t_0^2 + t_0^2 - t_0^2 - \delta^2 t_0^2 - 4\delta^2 + 2\delta t_0^2 + 4\delta t_0 - 4\delta^2 t_0 &< 0 \Leftrightarrow \\ -4\delta^2 t_0^2 - 4\delta^2 + 4\delta t_0 - 4\delta^2 t_0 &< 0 \Leftrightarrow -\delta t_0^2 - \delta + t_0 - \delta t_0 < 0 \Leftrightarrow \\ \delta t_0^2 + (\delta - 1)t_0 + \delta > 0 &\Leftrightarrow -\delta(t_0^2 + t_0 + 1) + t_0 > 0 \Leftrightarrow \delta(t_0^2 + t_0 + 1) < t_0 \Leftrightarrow \\ \delta < \frac{t_0}{t_0^2 + t_0 + 1} &\leq \frac{1}{3}. \end{aligned}$$

Последнее неравенство выполняется на $\left(0; \frac{1}{3}\right)$ потому, что наибольшее значение выражения $\frac{t_0}{t_0^2 + t_0 + 1}$ при $t_0 > 0$ равно $\frac{1}{3}$, следовательно, в силу эквивалентности преобразований верно и исходное неравенство $1 - x_1 < 0$.

Итак, получили, что $1 < x_1 < x_2$.

Трёхчлен $P_\sigma(x) > 0$ на $(-\infty, t_0)$ и, в частности, на всём $(0; 1)$, включая, конечно, и наше σ .

Итак, график v_1 лежит выше графика γ , который, в свою очередь, лежит выше графика функции $\hat{v}_1$. Но ведь обе точки A и B являются точками графика v_1 и поэтому обе оказываются выше графика $\hat{v}_1$, а должны быть обе по разные стороны от него.

Прежде чем перейти к случаю 4, сделаем следующее

ЗАМЕЧАНИЕ 3. В рассмотренных трёх случаях вместо интервала $(0; 1)$ можно было изначально брать произвольный интервал $(p, q) \subseteq (0; 1)$.

4. $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma)$ - знакопеременная функция на $(0; 1)$.

Рассмотрим функцию $\varphi(\sigma) = \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} dx = \sum_{n=1}^{+\infty} \int_n^{n+1} \frac{x-n}{x^{\sigma+1}} dx$. Для каждого $n \in \mathbb{N}$ имеем

неравенство $\int_n^{n+1} \frac{x-n}{x^{\sigma+1}} dx \leq \frac{1}{n^{\sigma+1}}$, поэтому функциональный ряд для функции $\varphi(\sigma)$ мажорируется рядом $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^{\sigma+1}}$ на отрезке $[\varepsilon, 1]$ для произвольного $\varepsilon \in (0; 1)$, следовательно, он по

признаку Вейерштрасса на этом отрезке сходится равномерно. Так как все слагаемые функционального ряда для функции $\varphi(\sigma)$ непрерывны как интегралы от непрерывных функций, то функция $\varphi(\sigma)$ непрерывна. В силу произвольности ε функция $\varphi(\sigma)$ непрерывна на $(0, 1]$ и, значит, и на $(0, 1)$.

Функция β является непрерывной функцией на $(0; 1)$, так как, согласно определению,

$$\beta(\sigma) = \frac{\varphi(\sigma)}{\int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} dx}, \text{ это отношение двух непрерывных функций, причём } \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma+1}} dx = \frac{1}{\sigma} > 0.$$

Запишем равенство (6) в виде $\varphi(\sigma) + v_1(\sigma, t_0) = \alpha(\sigma) \left(\frac{1}{\sigma} + \frac{t_0}{\sigma^2 + t_0^2} \right)$; выражая из него $\alpha(\sigma)$, устанавливаем её непрерывность, поскольку выражение в скобках непрерывно и не равно нигде нулю на $(0; 1)$, а функция $v_1(\sigma, t_0)$ непрерывна как действительная часть аналитической функции $\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx = \frac{1}{s-1} - \frac{\zeta(s)}{s}$, в соответствии с равенством (1).

Итак, функция $\alpha - \beta$ непрерывна на интервале $(0; 1)$, следовательно, она либо вообще не имеет нулей (тогда она знакопостоянна и подпадает под случаи 1 и 3, но не под случай 4), либо интервал $(0; 1)$ будет объединением двух множеств: множества нулей, замкнутого как прообраз одноточечного (и потому замкнутого) множества $\{0\}$, и открытого множества, которое получается удалением из интервала $(0; 1)$ указанного замкнутого множества.

Приведём полезную теорему 21 из книги [4, с. 135]:

ТЕОРЕМА. *Всякое открытое множество Γ на числовой прямой $\mathbb{R}$ есть сумма конечного или счётного множества дизъюнктивных интервалов, концы которых принадлежат дополнению к Γ замкнутому множеству $\Phi = \mathbb{R} \setminus \Gamma$; среди этих интервалов могут оказаться один или два бесконечных интервала вида $(-\infty; a)$ или $(a; +\infty)$.*

Итак, согласно этой теореме, интервал $(0; 1)$ является объединением замкнутого множества нулей функции $\alpha - \beta$ и конечного или счётного множества дизъюнктивных интервалов вида (p, q) с концами в замкнутом множестве нулей функции $\alpha - \beta$, кроме двух интервалов: один с левым концом 0 и правым концом в множестве нулей, и другой - с правым концом 1 и левым концом в множестве нулей. На каждом таком интервале функция $\alpha - \beta$ знакопостоянна.

Ранее мы установили, что при $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma) \leq 0$ соответствующие точки графика функции v_1 лежат ниже графика функции $\hat{v}_1$, а при $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma) > 0$ соответствующие точки графика функции v_1 , лежат выше графика функции $\hat{v}_1$, в нулях функции $\alpha(\sigma) - \beta(\sigma)$ были бы разрывы, но выше было доказано, что эта функция непрерывна.

Следовательно, так как график v_1 проходит через точку A , то и весь график находится ниже графика $\hat{v}_1$. Но точка B тоже лежит на графике v_1 и поэтому тоже лежит ниже графика $\hat{v}_1$. Но мы уже установили ранее, что точки A и B должны лежать по разные стороны от графика $\hat{v}_1$.

Итак, если график функции v_1 проходит через точку A , то он никак не сможет пройти через точку B .

Следовательно, предположение $\sigma_0 < \frac{1}{2}$ оказывается неверным.

Случай, когда абсцисса $\hat{\sigma}$ нетривиального нуля дзета-функции больше $\frac{1}{2}$, сводится к рассмотренному случаю: просто полагаем $\sigma_0 = 1 - \hat{\sigma}$.

Гипотеза Римана доказана. □

3. Заключение

В общем случае функция v_1 ведёт себя совершенно непредсказуемо, хотя, как мы установили, она и является линейной комбинацией двух гладких функций, но вычислить параметры $\alpha(\sigma)$ и $\beta(\sigma)$, которые «управляли» бы её поведением так, чтобы график функции v_1 прошёл через точку с абсциссой $\sigma_0 = \frac{1}{2}$ (действительной частью нетривиального нуля), не представляется возможным.

Но, тем не менее, об этих параметрах можно кое-что сказать. Например, следующее: их можно, ради интереса, приближённо вычислить, уже зная положительную мнимую часть t_0 нетривиального нуля.

Обозначим $\alpha(\sigma_0)$ и $\beta(\sigma_0)$ символами α_0 и β_0 соответственно.

Далее под σ_0 всегда будет подразумеваться $\frac{1}{2}$.

Пусть $\alpha_0 - \beta_0 > 0$. Так как $v_1(\sigma_0, t_0) \in U$, то $\frac{1}{t_0} > v_1(\sigma_0, t_0) = (\alpha_0 - \beta_0) \frac{1}{\sigma_0} + \alpha_0 \hat{v}_1(\sigma_0, t_0) > (\alpha_0 - \beta_0) \frac{1}{\sigma_0} = 2(\alpha_0 - \beta_0)$, следовательно, $\alpha_0 - \beta_0 < \frac{1}{2t_0}$.

Если же $\alpha_0 - \beta_0 < 0$, то $(\beta_0 - \alpha_0) \frac{1}{\sigma_0} < v_1(\sigma_0, t_0) + (\beta_0 - \alpha_0) \frac{1}{\sigma_0} = \alpha_0 \hat{v}_1(\sigma_0, t_0) < \hat{v}_1(\sigma_0, t_0)$. Так как под σ_0 мы подразумеваем $\frac{1}{2}$, получаем неравенство $2(\beta_0 - \alpha_0) < \frac{t_0}{0.25 + t_0^2} < \frac{1}{t_0}$, значит, $\beta_0 - \alpha_0 < \frac{1}{2t_0}$.

Таким образом, $|\alpha_0 - \beta_0| < \frac{1}{2t_0}$.

Для нетривиальных нулей с большими положительными мнимыми частями эти коэффициенты очень мало отличаются друг от друга.

Рассмотрим случай нетривиального нуля с наименьшей положительной мнимой частью $t_0 = 14.134725141...$ Тогда $\frac{1}{2t_0} = 0.03537387498...$ При $\sigma_0 = \frac{1}{2}$ выполняется равенство $(\alpha_0 - \beta_0) \frac{1}{\sigma_0} + \alpha_0 \hat{v}_1(\sigma_0, t_0) = v_2(\sigma_0, t_0)$, из которого получаем $1.035329666... \alpha_0 - \beta_0 = 0.03532966658...$

Найдём теперь β_0 в соответствии с равенством $\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma_0+1}} dx = \beta_0 \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma_0+1}} dx$.

Сначала вычислим интеграл в левой части равенства.

$$\begin{aligned} \int_k^{k+1} \frac{x-k}{x^{\sigma+1}} dx &= |x = k+t| = \int_0^1 \frac{t}{(k+t)^{\sigma+1}} dt = \int_0^1 \frac{k+t}{(k+t)^{\sigma+1}} dt - \int_0^1 \frac{k}{(k+t)^{\sigma+1}} dt = \\ &= \int_0^1 \frac{1}{(k+t)^\sigma} dt - k \int_0^1 \frac{1}{(k+t)^{\sigma+1}} dt = \left(\frac{1}{1-\sigma} \cdot (k+t)^{1-\sigma} + \frac{k}{\sigma} \cdot \frac{1}{(k+t)^\sigma} \right) \Big|_0^1 = \\ &= \left(\frac{1}{1-\sigma} \cdot (k+1)^{1-\sigma} + \frac{k}{\sigma} \cdot \frac{1}{(k+1)^\sigma} \right) - \left(\frac{1}{1-\sigma} \cdot k^{1-\sigma} + \frac{k}{\sigma} \cdot \frac{1}{k^\sigma} \right) = \\ &= \frac{(k+1)^{1-\sigma} - k^{1-\sigma}}{1-\sigma} + \frac{k}{\sigma} \cdot \left(\frac{1}{(k+1)^\sigma} - \frac{1}{k^\sigma} \right). \end{aligned}$$

Наконец, получаем

$$\int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma+1}} dx = \sum_{k=1}^{+\infty} \int_k^{k+1} \frac{x-k}{x^{\sigma+1}} dx = \sum_{k=1}^{+\infty} \left(\frac{(k+1)^{1-\sigma} - k^{1-\sigma}}{1-\sigma} + \frac{k}{\sigma} \cdot \left(\frac{1}{(k+1)^\sigma} - \frac{1}{k^\sigma} \right) \right).$$

$$\text{При } \sigma = \sigma_0 = \frac{1}{2} \text{ получаем } \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^{\sigma_0+1}} dx = 2, \int_1^{+\infty} \frac{\{x\}}{x^{\sigma_0+1}} dx = 2 \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{2k+1-2\sqrt{k}\sqrt{k+1}}{\sqrt{k+1}}.$$

$$\text{При } k = 1000000 \text{ получаем } \int_1^k \frac{\{x\}}{x^{\sigma_0+1}} dx = 0.9170582237...$$

Из равенства $0.9170582237 = \beta_0 \cdot 2$ получаем $\beta_0 = 0.4585291118...$

$$\text{Теперь можем найти } \alpha_0 = \frac{\beta_0 + 0.03532966658}{1.035329666} = 0.4770063050.$$

Попробуем теперь хотя бы приблизительно представить, как ведут себя левый и правый части уравнения $v_1(\sigma, t_0) = v_2(\sigma, t_0)$. Конечно, для этого надо бы знать значения коэффициен-

тов $\alpha(\sigma)$ и $\beta(\sigma)$ при всех остальных значениях σ , и выражения для их вычисления приведены во второй части статьи, но они очень громоздки.

Если предположить, что $\alpha(\sigma) \approx \alpha\left(\frac{1}{2}\right)$ и $\beta(\sigma) \approx \beta\left(\frac{1}{2}\right)$, то равенство (8) принимало бы приблизительно вид $v_1(\sigma, t_0) = \frac{0.0184771932}{\sigma} + \frac{6.742353011}{\sigma^2 + 199.7904548}$.

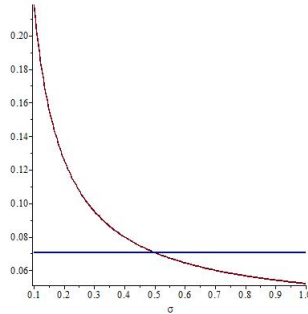


Рис. 4: Пересечение графиков v_1 и v_2

И это всё, что пока установлено.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галочкин А.И., Нестеренко Ю.В., Шидловский А.Б. Введение в теорию чисел. Изд-во Московского университета, 1984.
2. Титчмарш Е.К. Теория дзета-функции Римана. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953.
3. Зорич В.А. Математический анализ. Часть I. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: ФАЗИС, 1997.
4. Александров П.С. Введение в теорию множеств и общую топологию. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства “Наука”, 1977.

REFERENCES

1. Galochkin A.I., Nesterenko Yu.V., Shidlovskii A.B. : Introduction to number theory (Vvedenie v teoriyu chisel). 2nd ed, Lomonosov Moscow State University, 1984.
2. Titchmarsh, E. C.: The theory of the Riemann zeta-function, Oxford, 1951
3. Zorich V. A.: Mathematical Analysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
4. Aleksandroff P.S. Vvedenie v teoriyu mnozhestv i obschuyu topologiju. M.: Glavnaja redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izdatel'stva “Nauka”, 1977.