

УДК 621.771

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЬЦЕВОЙ
ГАЛТЕЛИ ПРОКАТНОГО ВАЛКА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО****Андрей Анатольевич Мальцев**доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Дана вероятностная оценка совместному влиянию предела прочности металла, из которого изготовлен прокатный валок, коэффициента снижения предела выносливости и абсциссы точки перелома кривой усталости в логарифмических координатах на ресурс, выраженный количеством металлических заготовок, прокатанных с момента начала эксплуатации валка до момента образования макроскопической трещины в области кольцевой галтели.

Ключевые слова: металлургия, кольцевая галтель, ресурс, метод Монте-Карло.**INVESTIGATION OF THE FATIGUE STRENGTH OF THE ANNULAR
GALTEL OF A ROLLING ROLL BY THE MONTE CARLO METHOD****Andrey A. Maltsev**Associate Professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

A probabilistic assessment is given of the combined effect of the tensile strength of the metal from which the rolling roll is made, the coefficient of reduction of the endurance limit and the abscissa of the fracture point of the fatigue curve in logarithmic coordinates on the resource expressed by the number of metal billets rolled from the start of operation of the roll to the moment of formation of a macroscopic crack in the area of the annular galtel.

Keywords: metallurgy, ring galtel, resource, Monte Carlo method.**Актуальность и цель исследования**

Объект исследования – кольцевая галтель валка, предназначенного для выполнения основной операции технологического процесса прокатки, связанной с деформацией металлической заготовки (рис. 1).



Рисунок 1. Кольцевая галтель прокатного валка

Цель исследования — изучение возможности использования современных методов моделирования, исследования и расчетов технологических комплексов в металлургическом (прокатном) производстве.

Задача исследования — тестирование компьютерной программы, разработанной автором в среде MathCAD для выполнения виртуальной лабораторной работы на тему «Вероятностное прогнозирование циклического ресурса рабочего валка», предусмотренной рабочей программой дисциплины «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» для специальности «Проектирование технологических машин и комплексов».

Материалы и методы исследования

Пусть предел прочности стали, из которой изготовлен рабочий валок,
 $\sigma_B = 850$ МПа .

Тогда, согласно ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости», предел выносливости при растяжении-сжатии для этой стали

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001 \sigma_B) \sigma_B \approx 395 \text{ МПа} ,$$

а предел выносливости при кручении

$$\tau_{-1} = 0,6 \sigma_{-1} \approx 237 \text{ МПа} .$$

Пусть коэффициент снижения предела выносливости

$$K = 1,7 .$$

Тогда предел выносливости кольцевой галтели при кручении

$$\tau_{-1 \text{ сеч}} = \frac{\tau_{-1}}{K} \approx 140 \text{ МПа} .$$

Абсцисса точки перелома кривой усталости (диаграммы Вёллера) в логарифмических координатах (ГОСТ 25.504-82)

$$N_G = 2 \cdot 10^6 \text{ циклов} .$$

Показатель наклона левой ветви кривой усталости в логарифмических координатах (ГОСТ 25.504-82)

$$m = \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K} \approx 9 .$$

Коэффициент чувствительности стали к асимметрии цикла нагрузки в области галтели при кручении (ГОСТ 25.504-82)

$$\Psi_{\tau \text{ сеч}} = \frac{0,01 + 10^{-4} \cdot \sigma_B}{K} \approx 0,06.$$

Пусть в результате цифровой обработки осциллограммы крутильных колебаний согласно ГОСТ 25.101-83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов» всего было выявлено 10 циклов напряжений, возникающих в кольцевой галтели валка в процессе прокатки заготовки [1, 2].

Вектор-столбец амплитуд напряжений выявленных циклов:

$$\tau_a = \begin{bmatrix} \tau_{a1} \\ \tau_{a2} \\ \tau_{a3} \\ \tau_{a4} \\ \tau_{a5} \\ \tau_{a6} \\ \tau_{a7} \\ \tau_{a8} \\ \tau_{a9} \\ \tau_{a10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 \\ 180 \\ 160 \\ 140 \\ 120 \\ 100 \\ 80 \\ 60 \\ 40 \\ 20 \end{bmatrix} \text{ МПа.}$$

Вектор-столбец средних значений напряжений выявленных циклов:

$$\tau_m = \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \\ \tau_{m3} \\ \tau_{m4} \\ \tau_{m5} \\ \tau_{m6} \\ \tau_{m7} \\ \tau_{m8} \\ \tau_{m9} \\ \tau_{m10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 180 \\ 180 \\ 180 \\ 170 \\ 170 \\ 170 \\ 170 \\ 160 \\ 160 \\ 160 \end{bmatrix} \text{ МПа.}$$

Вектор-столбец приведенных к симметричному циклу амплитуд напряжений выявленных циклов:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_a + \Psi_{\tau \text{ сеч}} \tau_m ;$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{\text{пр}1} \\ \tau_{\text{пр}2} \\ \tau_{\text{пр}3} \\ \tau_{\text{пр}4} \\ \tau_{\text{пр}5} \\ \tau_{\text{пр}6} \\ \tau_{\text{пр}7} \\ \tau_{\text{пр}8} \\ \tau_{\text{пр}9} \\ \tau_{\text{пр}10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 \\ 180 \\ 160 \\ 140 \\ 120 \\ 100 \\ 80 \\ 60 \\ 40 \\ 20 \end{bmatrix} + 0,06 \begin{bmatrix} 180 \\ 180 \\ 180 \\ 170 \\ 170 \\ 170 \\ 170 \\ 160 \\ 160 \\ 160 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 210 \\ 190 \\ 170 \\ 150 \\ 130 \\ 110 \\ 90 \\ 69 \\ 49 \\ 29 \end{bmatrix} \text{ МПа.}$$

Уравнение кривой усталости, построенной в логарифмических координатах, имеет вид:

$$N_i = \begin{cases} \frac{\tau_{-1 \text{ сеч}}^m N_G}{\tau_{\text{пр}i}^m} & , \text{ при } \tau_{\text{пр}i} \geq \tau_{-1 \text{ сеч}} ; \\ \infty & , \text{ при } \tau_{\text{пр}i} < \tau_{-1 \text{ сеч}} . \end{cases}$$

где $i = 1 \dots 10$.

Наибольшая приведенная к симметричному циклу амплитуда превышает предел выносливости кольцевой галтели при кручении:

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{пр } 1} \geq \tau_{-1 \text{ сеч}} ; \\ 210 \text{ МПа} > 140 \text{ МПа} .$$

Выявлено 7 амплитуд, превышающих половину предела выносливости кольцевой галтели при кручении:

$$\begin{bmatrix} \tau_{\text{пр } 1} \\ \tau_{\text{пр } 2} \\ \tau_{\text{пр } 3} \\ \tau_{\text{пр } 4} \\ \tau_{\text{пр } 5} \\ \tau_{\text{пр } 6} \\ \tau_{\text{пр } 7} \end{bmatrix} \geq 0,5 \tau_{-1 \text{ сеч}} ; \quad \begin{bmatrix} 210 \\ 190 \\ 170 \\ 150 \\ 130 \\ 110 \\ 90 \end{bmatrix} > 70 \text{ МПа} .$$

Корректирующий коэффициент

$$a_p = \frac{\sum_{i=1}^7 \left(\tau_{\text{пр } i} \frac{1}{7} \right) - 0,5 \tau_{-1 \text{ сеч}}}{\tau_{\max} - 0,5 \tau_{-1 \text{ сеч}}} = 0,57 .$$

Если бы в результате расчета получилось, что $a_p < 0,1$, то, согласно [3], нужно было бы принять $a_p = 0,1$.

Выявлено 4 амплитуды, превышающих предел выносливости кольцевой галтели при кручении:

$$\begin{bmatrix} \tau_{\text{пр } 1} \\ \tau_{\text{пр } 2} \\ \tau_{\text{пр } 3} \\ \tau_{\text{пр } 4} \end{bmatrix} \geq \tau_{-1 \text{ сеч}} ; \quad \begin{bmatrix} 210 \\ 190 \\ 170 \\ 150 \end{bmatrix} > 140 \text{ МПа} .$$

Количество металлических заготовок, прокатанных с момента начала эксплуатации вала до момента образования макроскопической трещины в области кольцевой галтели, вычислен по формуле Когаева-Серенсена [3]:

$$N_{\text{заг}} = \frac{a_p \tau_{-1 \text{ сеч}}^m N_G}{\sum_{j=1}^4 \tau_{\text{пр } j}^m} = 20 \text{ 000 заготовок} .$$

Результаты исследования и выводы

Тест №1 – для кольцевой галтели прокатного вала в логарифмических координатах построена кривая усталости (рис. 2):

$$\sigma_B := 850$$

$$\sigma_{-1} := (0,55 - 0,0001 \cdot \sigma_B) \cdot \sigma_B \rightarrow 395$$

$$\tau_{-1} := 0,6 \cdot \sigma_{-1} \rightarrow 237$$

$$K := 1,7$$

$$\tau_{-1 \text{ сеч}} := \frac{\tau_{-1}}{K} \rightarrow 140$$

$$N_G := 2 \cdot 10^6$$

$$m := \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K} \rightarrow 9$$

$$\Psi_{\tau_{\text{сеч}}} := \frac{0.01 + 10^{-4} \cdot \sigma_{\text{В}}}{\text{К}} \rightarrow 0.06$$

$$\tau_{\text{пр}} := \begin{pmatrix} 200 \\ 180 \\ 160 \\ 140 \\ 120 \\ 100 \\ 80 \\ 60 \\ 40 \\ 20 \end{pmatrix} + \Psi_{\tau_{\text{сеч}}} \cdot \begin{pmatrix} 180 \\ 180 \\ 180 \\ 170 \\ 170 \\ 170 \\ 170 \\ 160 \\ 160 \\ 160 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 210 \\ 190 \\ 170 \\ 150 \\ 130 \\ 110 \\ 90 \\ 69 \\ 49 \\ 29 \end{pmatrix}$$

индекс := 1 .. 10

$$N_{\text{индекс}} := \begin{cases} \frac{\tau_{-1\text{сеч}}^m \cdot N_G}{(\tau_{\text{приндекс}})^m} & \text{if } \tau_{\text{приндекс}} \geq \tau_{-1\text{сеч}} \\ 10^7 & \text{if } \tau_{\text{приндекс}} < \tau_{-1\text{сеч}} \end{cases}$$

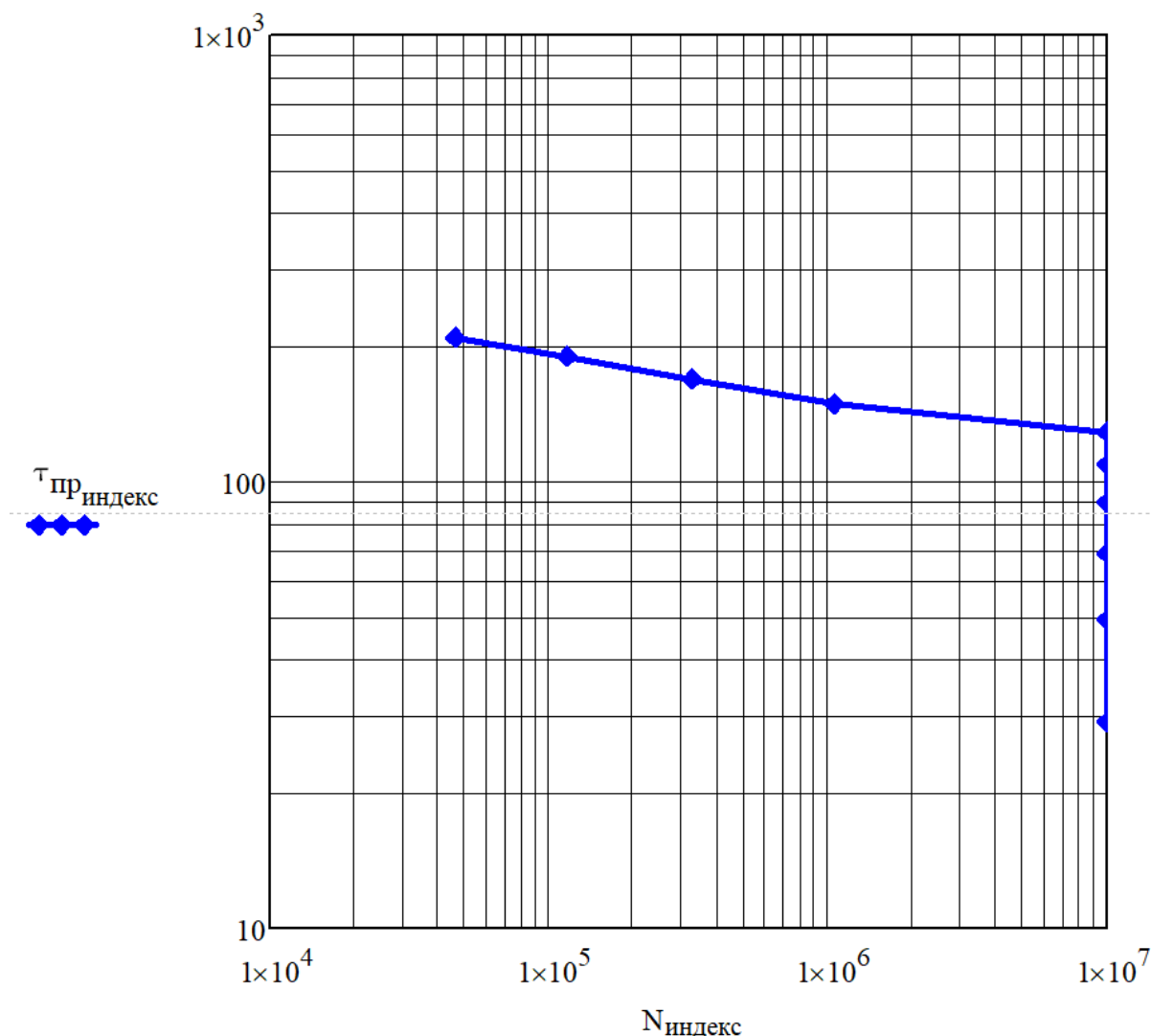


Рисунок 2. Диаграмма Вёллера для кольцевой галтели

$$\tau_{\max} := \max(\tau_{\text{пр}}) \rightarrow 210$$

$$\alpha_p := \frac{\sum_{i=1}^7 \left(\tau_{\text{пр}_i} \cdot \frac{1}{7} \right) - 0.5 \cdot \tau_{-1\text{сеч}}}{\tau_{\max} - 0.5 \cdot \tau_{-1\text{сеч}}} \rightarrow 0.57$$

$$\alpha_p := \begin{cases} \alpha_p & \text{if } \alpha_p \geq 0.1 \\ 0.1 & \text{if } \alpha_p < 0.1 \end{cases} \rightarrow 0.57$$

$$N_{\text{заг}} := \frac{\alpha_p \cdot (\tau_{-1\text{сеч}})^m \cdot N_G}{\sum_{j=1}^4 (\tau_{\text{пр}_j})^m} \rightarrow 2 \times 10^4$$

Вывод: если бы оказалось, что $\tau_{\max} < \tau_{-1\text{сеч}}$, то можно было бы утверждать, что ресурс кольцевой галтели не ограничен по усталости.

Тест №2 — выполнено статистическое моделирование методом Монте-Карло циклического ресурса кольцевой галтели рабочего валка (рис. 3 – 8):

$$\sigma_{\text{В индекс}} := \text{norm}(1000, 850, 1)$$

$$\text{индекс} := 1 .. 1000$$

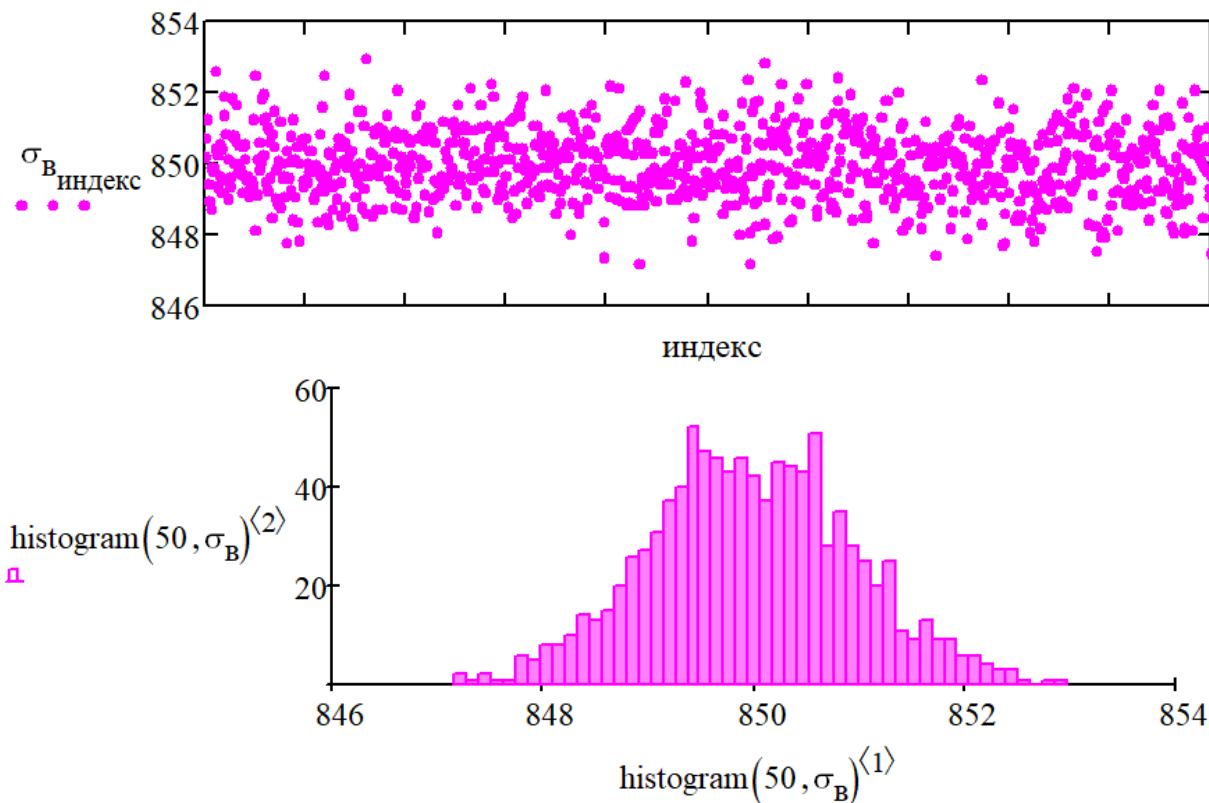
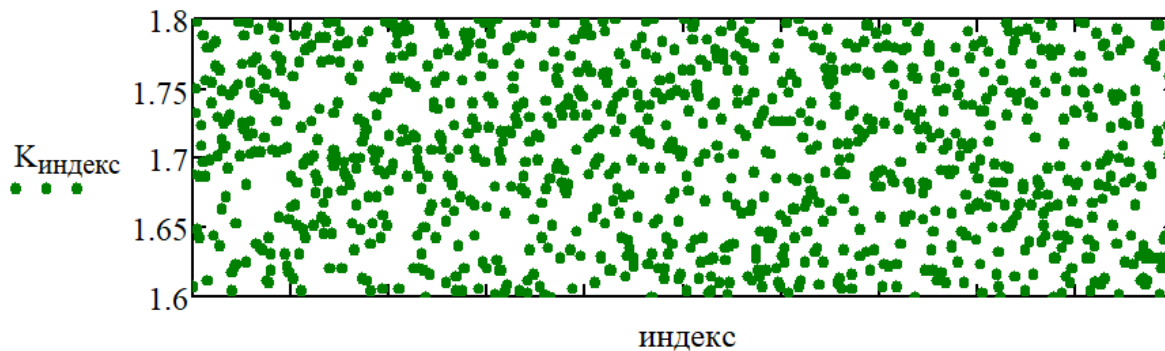


Рисунок 3. Нормальное распределение случайной величины $\sigma_{\text{В}}$

$$\sigma_{-1 \text{ индекс}} := (0.55 - 0.0001 \cdot \sigma_{\text{В индекс}}) \cdot \sigma_{\text{В индекс}}$$

$$\tau_{-1 \text{ индекс}} := 0.6 \cdot \sigma_{-1 \text{ индекс}}$$

$$K := \text{runif}(1000, 1.6, 1.8)$$



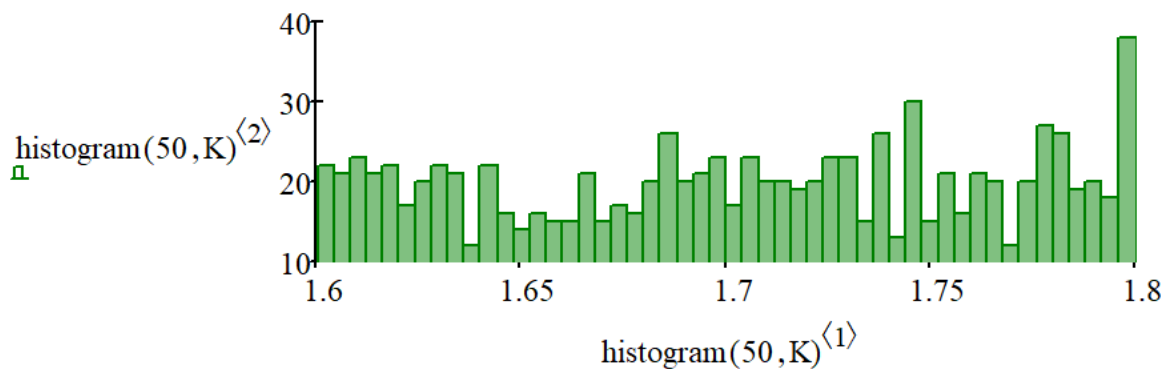


Рисунок 4. Равномерное распределение случайной величины K

$$\tau_{-1\text{сеч}}_{\text{индекс}} := \frac{\tau_{-1\text{индекс}}}{K_{\text{индекс}}}$$

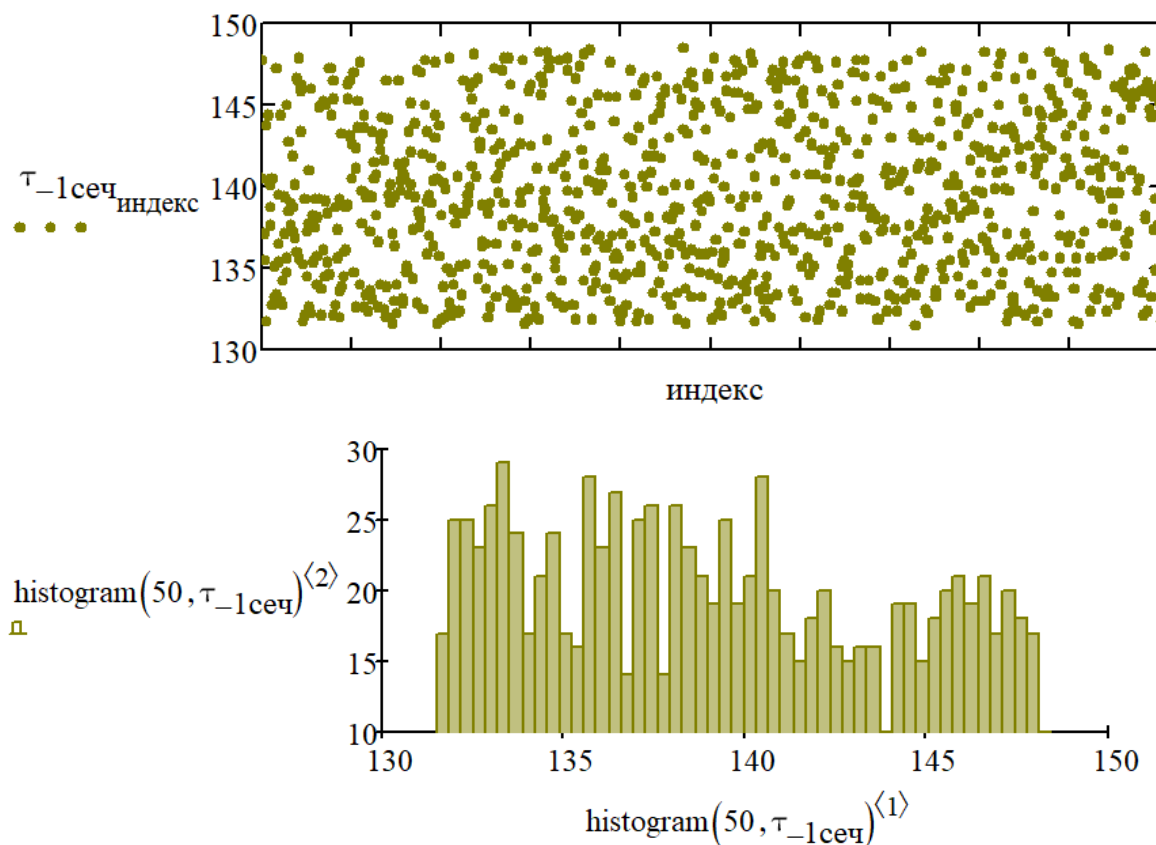


Рисунок 5. Распределение случайной величины $\tau_{-1\text{сеч}}$

$$N_G := \text{runif}(1000, 1 \cdot 10^6, 3 \cdot 10^6)$$

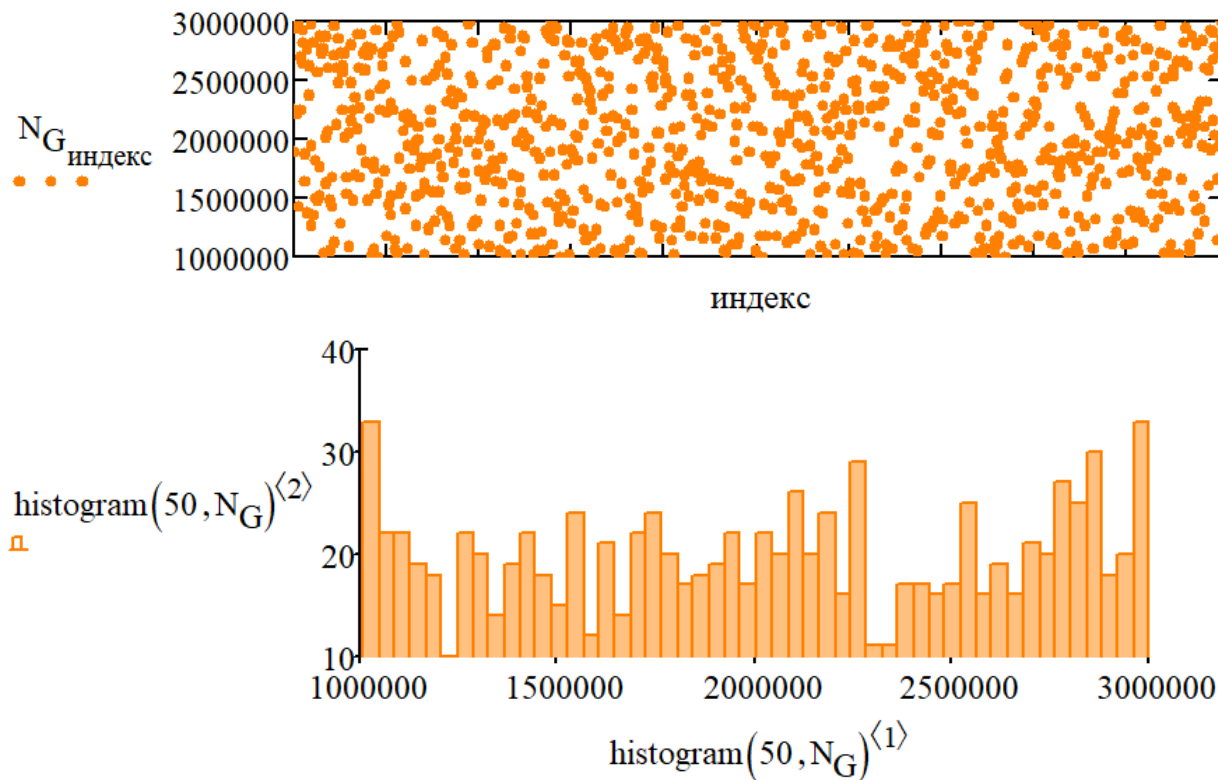


Рисунок 6. Равномерное распределение случайной величины N_G

$$m_{\text{индекс}} := \frac{5 + \frac{\sigma_{\text{В индекс}}}{80}}{K_{\text{индекс}}}$$

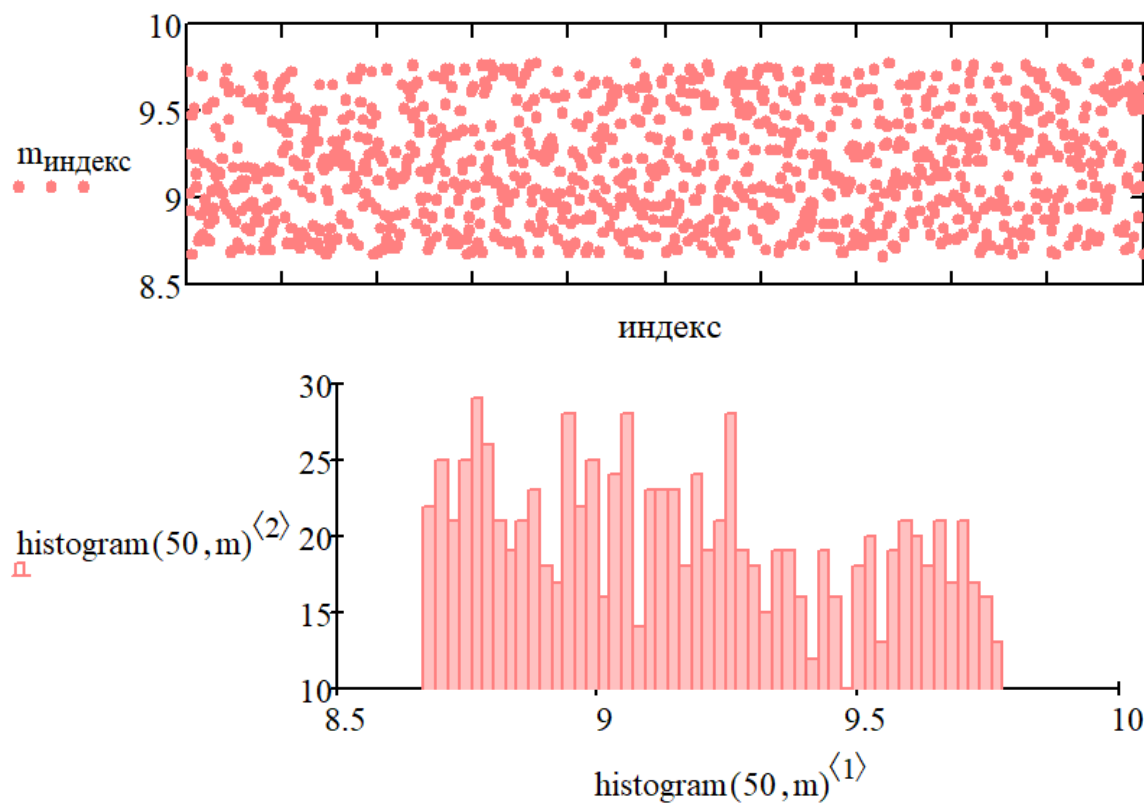


Рисунок 7. Распределение случайной величины m

$$\alpha_{P_{индекс}} := \frac{\sum_{i=1}^7 \left(\tau_{пр_i} \cdot \frac{1}{7} \right) - 0.5 \cdot \tau_{-1сеч_{индекс}}}{\tau_{max} - 0.5 \cdot \tau_{-1сеч_{индекс}}}$$

$$\alpha_{P_{индекс}} := \begin{cases} \alpha_{P_{индекс}} & \text{if } \alpha_{P_{индекс}} \geq 0.1 \\ 0.1 & \text{if } \alpha_{P_{индекс}} < 0.1 \end{cases}$$

$$N_{заг_{индекс}} := \frac{\alpha_{P_{индекс}} \cdot (\tau_{-1сеч_{индекс}})^{m_{индекс}} \cdot N_{G_{индекс}}}{\sum_{j=1}^4 (\tau_{пр_j})^{m_{индекс}}}$$

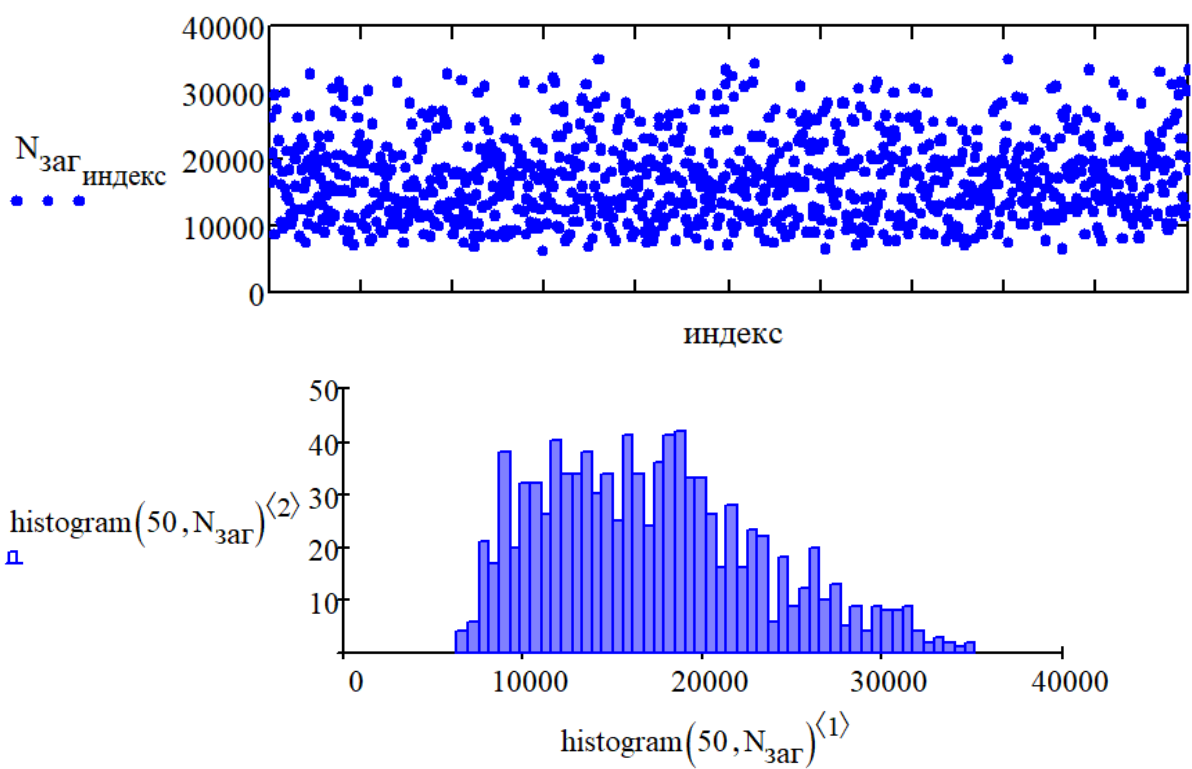


Рисунок 8. Распределение случайной величины $N_{заг}$

Вывод: визуально обнаружено, что распределение случайной величины ресурса кольцевой галтели прокатного валка не похоже на нормальное.

Список литературы:

1. Мальцев А.А., Беляков Ю.И., Тарасенко И.А. Прогнозирование циклического ресурса вала электропривода металлургической машины по оцифрованной тензометрической осциллограмме. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2020, № 03. – С. 109 – 119. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-3-2020/a229909> .

2. Мальцев А.А. Исследование методов обработки осциллограммы крутильных колебаний главного электропривода металлургической машины в среде MathCAD. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2019, №10. – С. 74 – 86. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-10-2019/a229809> .
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – Москва, «Машиностроение», 1977. – 232 с.

References:

1. Maltsev A. A., Belyakov Yu. I., Tarasenko I. A. Forecasting the cyclic resource of the electric drive shaft of a metallurgical machine using a digitized tensometric oscillogram. – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2020, No. 03. – Pp. 109 – 119. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-3-2020/a229909> [in Russian].
2. Maltsev A. A. Investigation of methods for processing the torsional oscillogram of the main electric drive of a metallurgical machine in the MathCAD environment. – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2019, No. 10. – Pp. 74 – 86. – Mode of access: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-10-2019/a229809> [in Russian].
3. Kogaev V. P. Calculations for strength at stresses, variables in time. Moscow, Mashinostroenie, 1977. – 232 p. [in Russian].