

УДК 621.31:621.771.06-88

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕСУРСА ШПИНДЕЛЬНОГО  
ВАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА 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](mailto:a.a.mal@bmstu.ru)**Аннотация**

Путем многократного розыгрыша методом Монте-Карло случайной величины корректирующего коэффициента, входящего в расчетную формулу Когаева-Серенсена, получен вероятностный прогноз циклического ресурса шпиндельного вала электропривода рабочих валков прокатного стана, выраженный количеством прокатанных заготовок до разрушения вала в его опасном сечении.

**Ключевые слова:** электропривод, метод Монте-Карло, ресурс, металлургия.

**PREDICTION OF THE CYCLIC RESOURCE OF THE SPINDLE SHAFT OF  
THE ROLLING MILL ELECTRIC DRIVE BY THE MONTE CARLO METHOD****Andrey A. Maltsev**

associate professor, Bauman Moscow State Technical University

ФН-7 and МТ-10 Departments

e-mail: [a.a.mal@bmstu.ru](mailto:a.a.mal@bmstu.ru)**ABSTRACT**

Through repeated drawing of the Monte-Carlo random variable correction coefficient included in a design formula Kogaev-sørensen, obtained a probabilistic forecast of the cyclic life of the spindle shaft of the electric drive of the work rolls of the rolling mill, expressed as a number of laminated blanks to failure of the shaft at section.

**Keywords:** electric drive, Monte Carlo method, resource, metallurgy.

**Введение**

Статистический характер усталостной прочности ступенчатых валов главных электроприводов металлургических машин обусловлен влиянием многочисленных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на скорость роста микротрещин в металле. Более того, лабораторные испытания на усталость показывают, что образцы из одной и той же стали при одинаковых условиях нагружения разрушаются

при существенно различных количествах циклов. Поэтому на стадии проектирования широкое развитие получили именно вероятностные методы прочностных расчетов валов при напряжениях, переменных во времени [1].

*Объект исследования* — главный электропривод производственного металлопрокатного стана, приводящий рабочие валки во вращение.

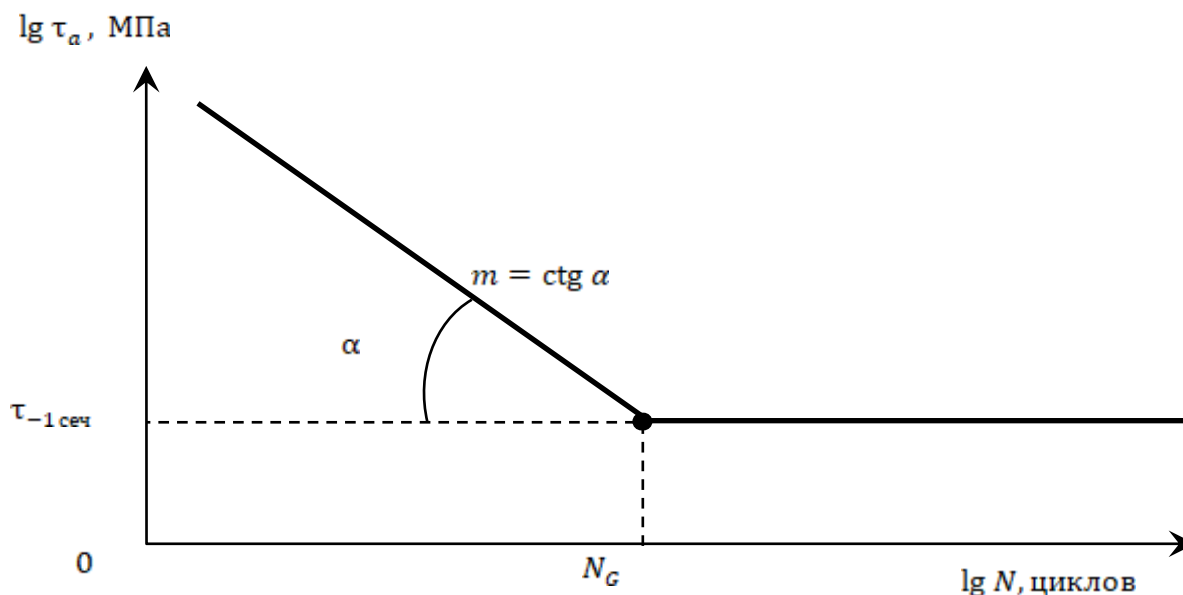
*Предмет исследования* — циклический ресурс опасного сплошного круглого поперечного сечения шпиндельного вала электропривода [2, 3].

*Цель исследования* — вычислить, сколько стальных заготовок можно обработать (прокатать) на стане от момента времени начала эксплуатации до момента времени поломки шпиндельного вала в его опасном сечении.

*Задача исследования* — запрограммировать в компьютерной среде MathCAD формулу Когаева-Серенсена, выведенную этими учеными на основании линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, и, разыграв методом Монте-Карло случайную величину корректирующего коэффициента, получить вероятностный прогноз усталостной долговечности шпиндельного вала в виде гистограммы распределения частот циклического ресурса опасного сечения.

### Материалы и методы исследования

*Первые исходные данные* — параметры кривой усталости, построенной в логарифмических координатах для опасного сечения шпиндельного вала (рис. 1).



**Рисунок 1.** Диаграмма Вёллера [2, 3]:

$N$  — ось чисел циклов нагружения;

$\tau_\alpha$  — ось амплитудных напряжений;

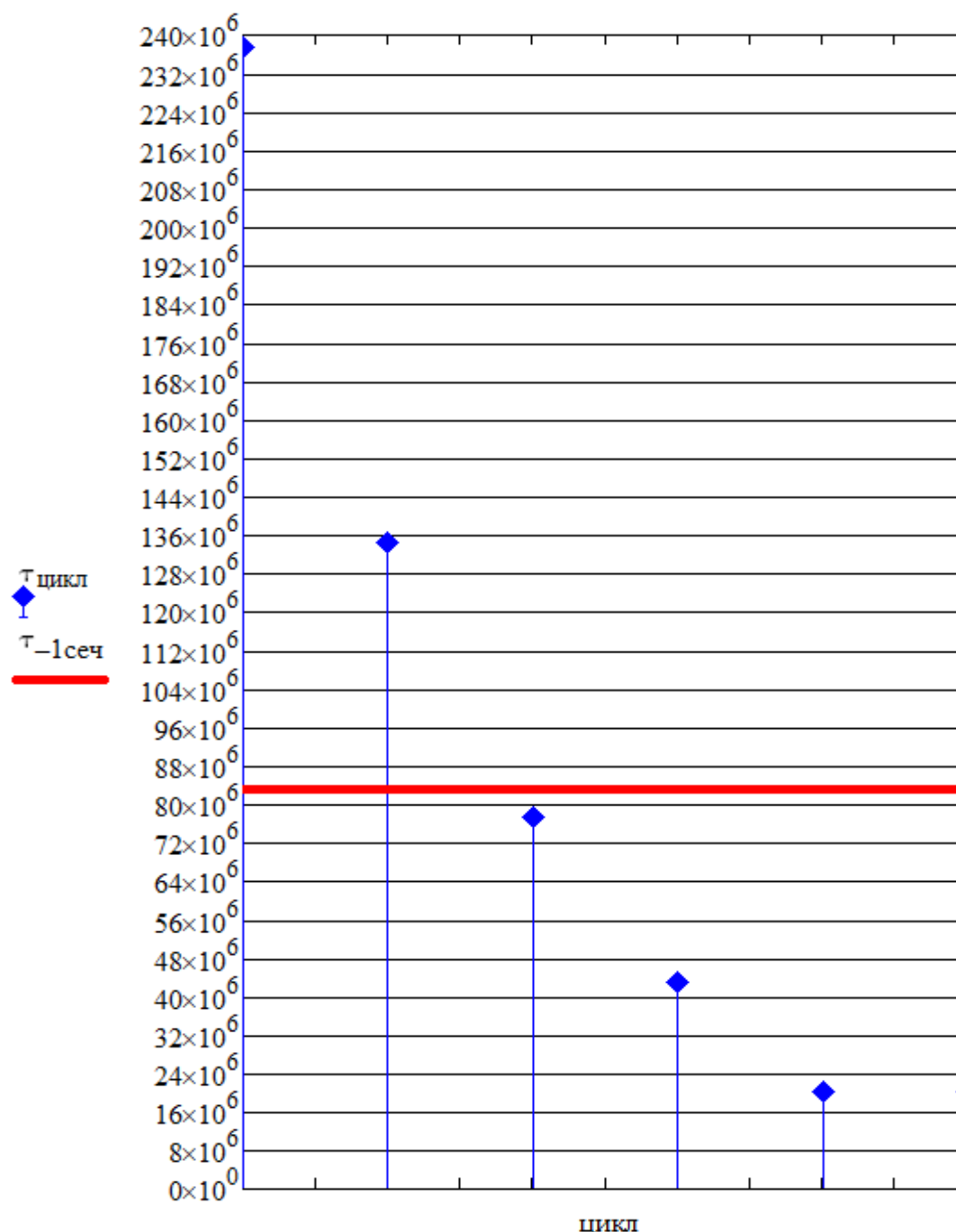
$\tau_{-1сеч} = 83$  МПа — предел выносливости;

$N_G = 2 \cdot 10^6$  циклов — абсцисса точки перелома;

$m = 5,8$  — показатель наклона левой ветви

Смысл диаграммы Вёллера таков: если шпиндельный вал в своем опасном сечении нагружен последовательными циклами с одинаковыми амплитудными напряжениями  $\tau_\alpha$ , которое превышает предел выносливости опасного сечения  $\tau_{-1сеч}$ , то после определенного числа циклов  $N < N_G$  произойдет разрушение, а если  $\tau_\alpha < \tau_{-1сеч}$ , то разрушения шпинделя в опасном сечении не происходит.

Вторые исходные данные – повреждающие (превышающие предел выносливости) амплитуды спектра нагружения шпиндельного вала в его опасном сечении (рис. 2).



**Рисунок 2.** Спектр нагружения[3]:  
 $\tau_1 = 240 \cdot 10^6$  МПа – амплитуда первого цикла;  
 $\tau_2 = 132 \cdot 10^6$  МПа – амплитуда второго цикла

В расчетной практике до сих пор широко применяется методика, в основу которой заложена гипотеза накопления усталостных повреждений, предложенная Пальмгреном (1924 г.) и развитая Майнером (1945 г.).

Линейная гипотеза Пальмгрена-Майнера приводит к значительным погрешностям в результатах расчета циклической прочности и нуждается в коррекции.

Циклический ресурс – количество заготовок, прокатанных до поломки шпиндельного вала в его опасном сечении, – вычислен на основании скорректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, после подстановки исходных данных в формулу Когаева-Серенсена [1]:

$$N_{\text{заг}} = \frac{K \tau_{-1\text{сеч}}^m N_G}{\tau_1^m + \tau_2^m}, \quad (1)$$

где  $K \in [0,1; 1]$  – корректирующий коэффициент, разыгрываемый методом Монте-Карло как случайная величина.

Формула (1) запрограммирована в компьютерной среде MathCAD:

$$\tau_{-1\text{сеч}} := 83 \cdot 10^6$$

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

$$m := 5.8$$

$$\tau_1 := 240 \cdot 10^6$$

$$\tau_2 := 132 \cdot 10^6$$

$$K := \text{runif}(1000, 0.1, 1)$$

$$N_{\text{заг}} := \frac{K \cdot (\tau_{-1\text{сеч}})^m \cdot N_G}{\tau_1^m + \tau_2^m}$$

### Результаты исследования

Опыт 1 – коэффициент  $K := \text{runif}(1000, 0.1, 1)$  (рис. 3 – 6).

	1
1	0.101
2	0.274
3	0.627
4	0.415
5	0.841
6	0.257
7	0.739
8	0.374
9	0.182
10	0.233
11	0.990
12	0.207
13	0.108
14	0.578
15	0.642
16	...

$K =$

	1	2
1	0.1	26
2	0.1	17
3	0.1	24
4	0.2	12
5	0.2	21
6	0.2	21
7	0.2	21
8	0.2	28
9	0.3	18
10	0.3	21
11	0.3	17
12	0.3	25
13	0.3	21
14	0.3	18
15	0.4	17
16	0.4	...

$\text{histogram}(50, K) =$

розыгрыш := 1 .. 1000

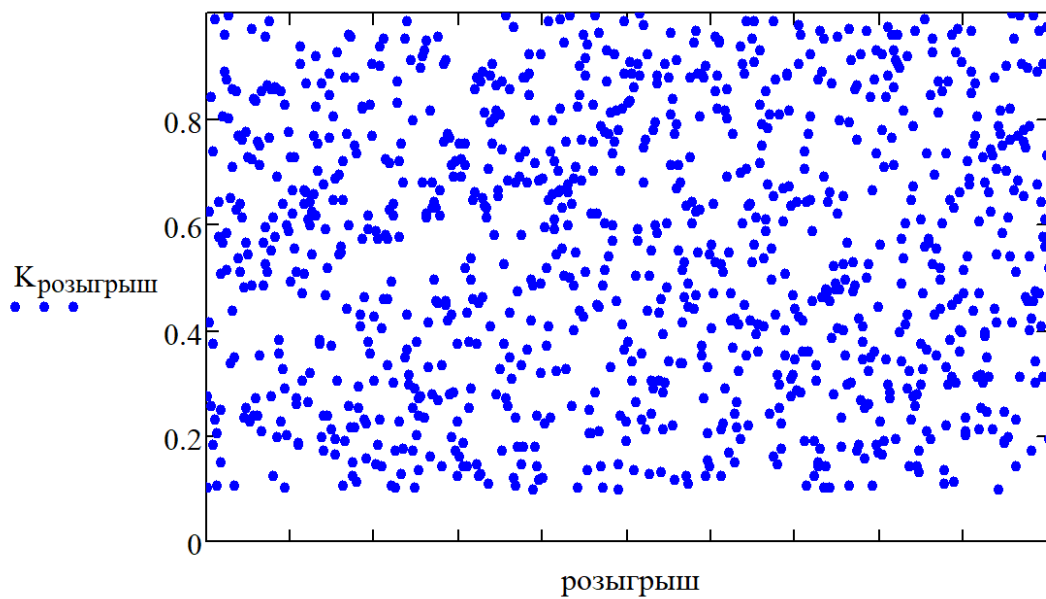
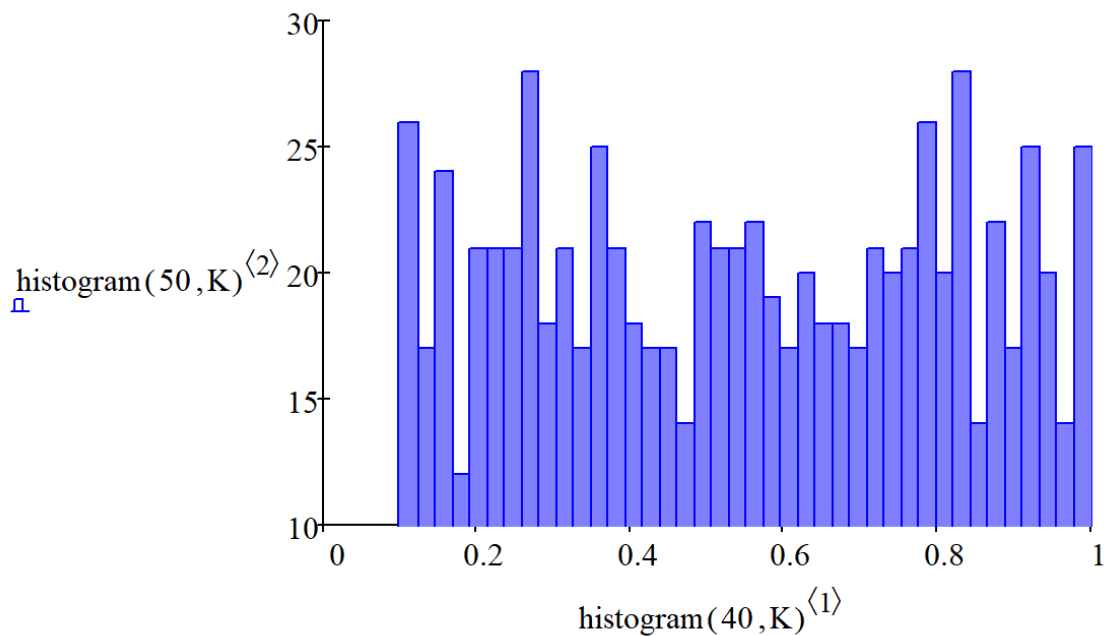


Рисунок 3. Результат 1000 розыгрышей случайной величины  $K$ , равномерно распределенной на интервале  $[0, 1; 1]$



**Рисунок 4.** Гистограмма распределения частот случайной величины  $K$ , равномерно распределенной на интервале  $[0,1; 1]$ , по результату 1000 розыгрышей

	1
1	415
2	$1.1 \cdot 10^3$
3	$2.6 \cdot 10^3$
4	$1.7 \cdot 10^3$
5	$3.4 \cdot 10^3$
6	$1.1 \cdot 10^3$
7	$3 \cdot 10^3$
8	$1.5 \cdot 10^3$
9	747.9
10	954.3
11	$4.1 \cdot 10^3$
12	850.1
13	443.3
14	$2.4 \cdot 10^3$
15	$2.6 \cdot 10^3$
16	...

$N_{\text{заг}} =$

$\text{histogram}(50, N_{\text{заг}}) =$

	1	2
1	449.6	26
2	523.4	17
3	597.1	24
4	670.9	12
5	744.7	21
6	818.4	21
7	892.2	21
8	965.9	28
9	$1 \cdot 10^3$	18
10	$1.1 \cdot 10^3$	21
11	$1.2 \cdot 10^3$	17
12	$1.3 \cdot 10^3$	25
13	$1.3 \cdot 10^3$	21
14	$1.4 \cdot 10^3$	18
15	$1.5 \cdot 10^3$	17
16	$1.6 \cdot 10^3$	...

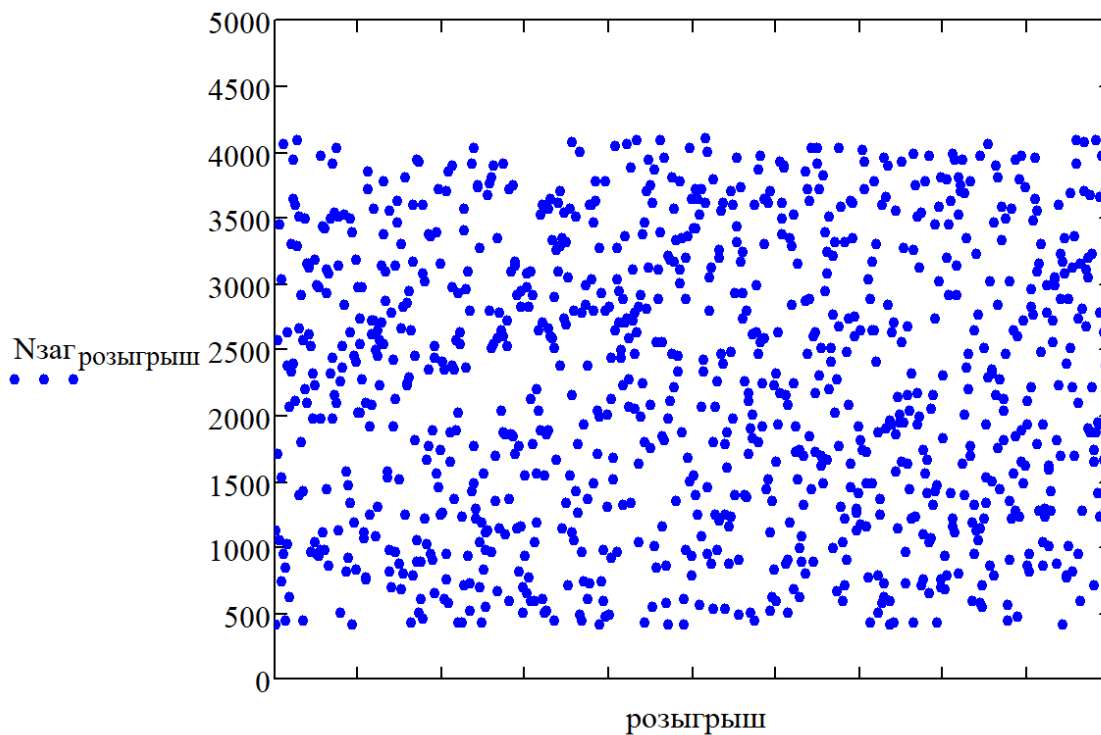


Рисунок 5. Вероятностная оценка циклического ресурса  $N_{заг}$  по результату 1000 розыгрышей случайной величины  $K$

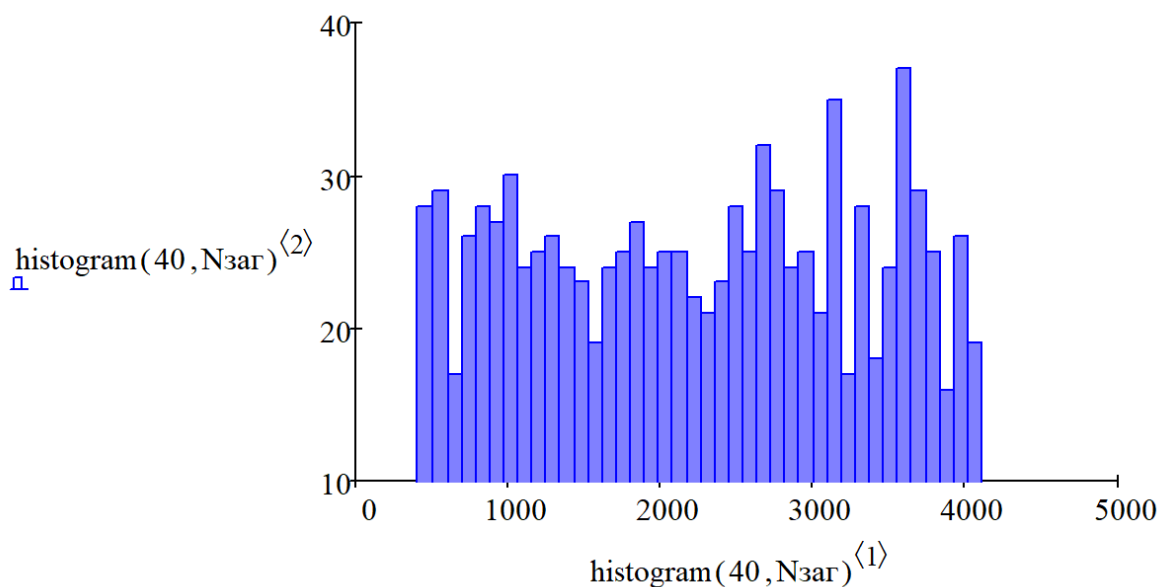
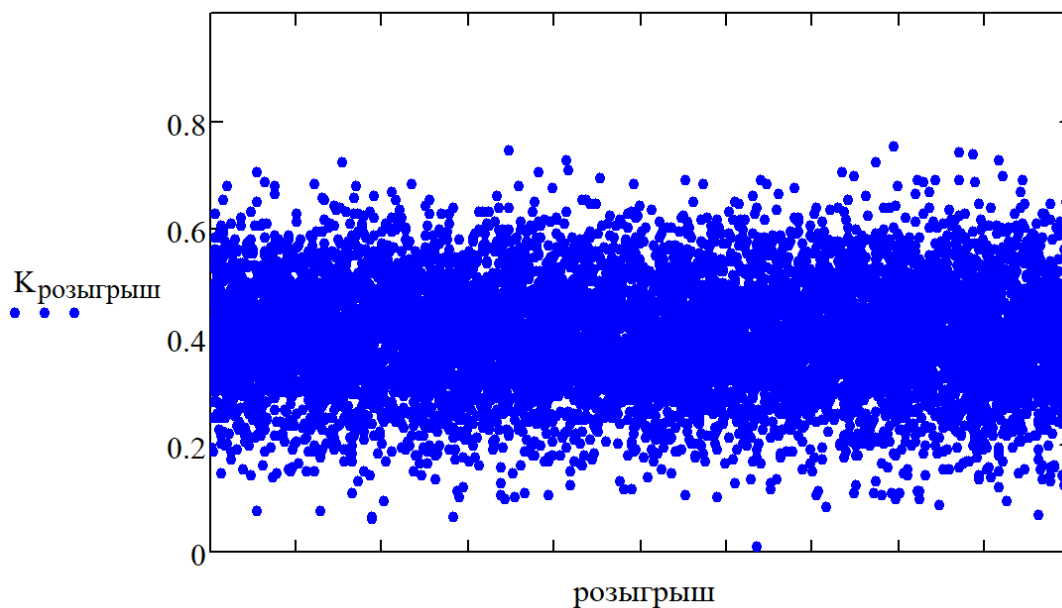
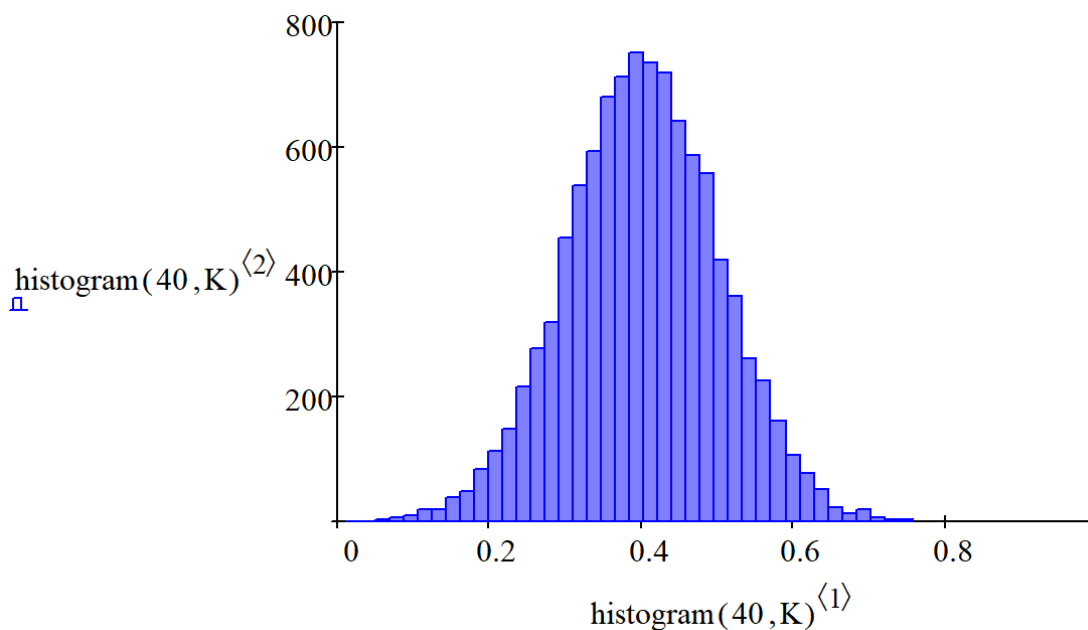


Рисунок 6. Гистограмма распределения частот циклического ресурса  $N_{заг}$  по результату 1000 розыгрышей случайной величины  $K$

Опыт 2 – коэффициент  $K := \text{norm}(10000, 0.4, 0.1)$  (рис. 7 – 10).



*Рисунок 7. Результат 10000 розыгрышей случайной величины  $K$ , нормально распределенной с математическим ожиданием 0,4 и среднеквадратическим отклонением 0,1*



*Рисунок 8. Гистограмма распределения частот случайной величины  $K$ , нормально распределенной с математическим ожиданием 0,4 и среднеквадратическим отклонением 0,1, по результату 10000 розыгрышей*



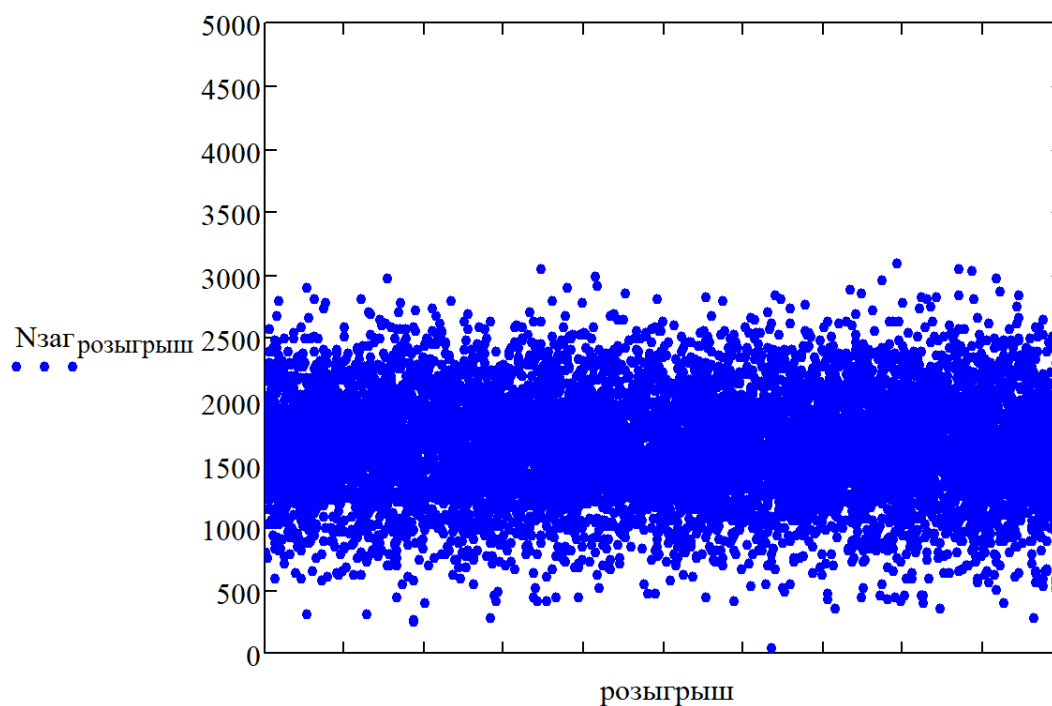


Рисунок 9. Вероятностная оценка циклического ресурса  $N_{zag}$  по результату 10000 розыгрышей случайной величины  $K$

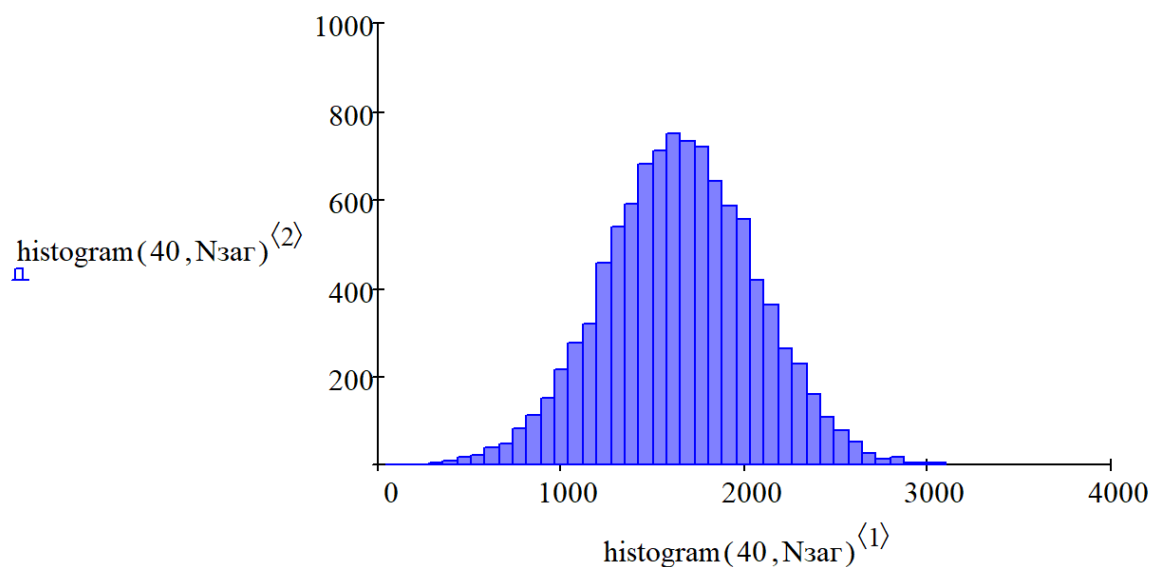


Рисунок 10. Гистограмма распределения частот циклического ресурса  $N_{zag}$  по результату 10000 розыгрышей случайной величины  $K$

### Выводы

1. В результате 1000 розыгрышей методом Монте-Карло случайной величины корректирующего коэффициента  $K$ , равномерно распределенной на интервале  $[0,1; 1]$ , было обнаружено, что циклический ресурс шпиндельного вала в опасном сечении  $N_{zag}$  (штук) распределен в приблизительном интервале  $[500; 4000]$ .

2. В результате 10000 розыгрышей методом Монте-Карло случайной величины корректирующего коэффициента  $K$ , нормально распределенной с математическим ожиданием 0,4 и среднеквадратическим отклонением 0,1, обнаружено, что циклический

ресурс шпиндельного вала в опасном сечении  $N_{\text{заг}}$  (штук) имеет нормальное распределение с математическим ожиданием 1643 и среднеквадратическим отклонением 419.

#### Список литературы

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – Москва, «Машиностроение», 1977. – 232 с.
2. Мальцев А.А., Беляков Ю.И., Тарасенко И.А. Статистическое моделирование циклического ресурса шпиндельного вала электропривода металлургической машины. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2020, № 04. – С. 158– 169. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-4-2020/a229937>.
3. 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>.

#### References

1. Kogaev V. P. Calculations for strength at stresses, variables in time. Moscow, Mashinostroenie, 1977. – 232 p. [in Russian].
2. Maltsev A. A., Belyakov Yu. I., Tarasenko I. A. Statistical modeling of the cyclic resource of the spindle shaft of an electric drive of a metallurgical machine. – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2020, No. 04. – P. 158-169. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-4-2020/a229937> [in Russian].
3. 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. – P. 109-119. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-3-2020/a229909> [in Russian].