

УДК 621.771

**ОБРАБОТКА ОСЦИЛЛОГРАММЫ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
МЕТОДОМ ПОЛНЫХ ЦИКЛОВ****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Филатов Александр Андреевич,**доктор технических наук, НИИ КМиТП МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: faa47@list.ru**Аннотация**

Проанализирована производственная осциллограмма, полученная при прокатке полосы 1,2×1250 из стали 3КП в черновой клети №5 непрерывного широкополосного стана 2000 Новолипецкого металлургического комбината. Выявлены амплитудные и средние значения циклов нагружения вала электродвигателя крутящим моментом – информация, необходимая для реконструкции привода пятой клети НШС 2000 НЛМК.

Ключевые слова: осциллограмма, колебания, надежность.**TORSIONAL OSCILLOGRAM PROCESSING BY THE FULL CYCLE METHOD****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Alexander A. Filatov,**Doctor of Technical Sciences, Research Institute of SM and TP
e-mail: faa47@list.ru**ABSTRACT**

The production oscillogram obtained by rolling a 1.2×1250 strip of 3KP steel in the roughing box No. 5 of the continuous broadband mill 2000 of the Novolipetsk Metallurgical Combine is analyzed. The amplitude and average values of the cycles of loading the shaft of the electric motor with torque are revealed, which is the information necessary for the reconstruction of the drive of the fifth NШС 2000 НЛМК crate.

Keywords: oscilloscope, fluctuations, reliability.

Объект исследования – производственная осциллограмма, полученная автором А. А. Филатовым (Разработка теоретических основ проектирования и совершенствование трансмиссий высокомоментных главных приводов прокатных клетей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2004) при прокатке полосы 1,2×1250 из стали ЗКП в черновой клети №5 НШС 2000 НЛМК (рис. 1).

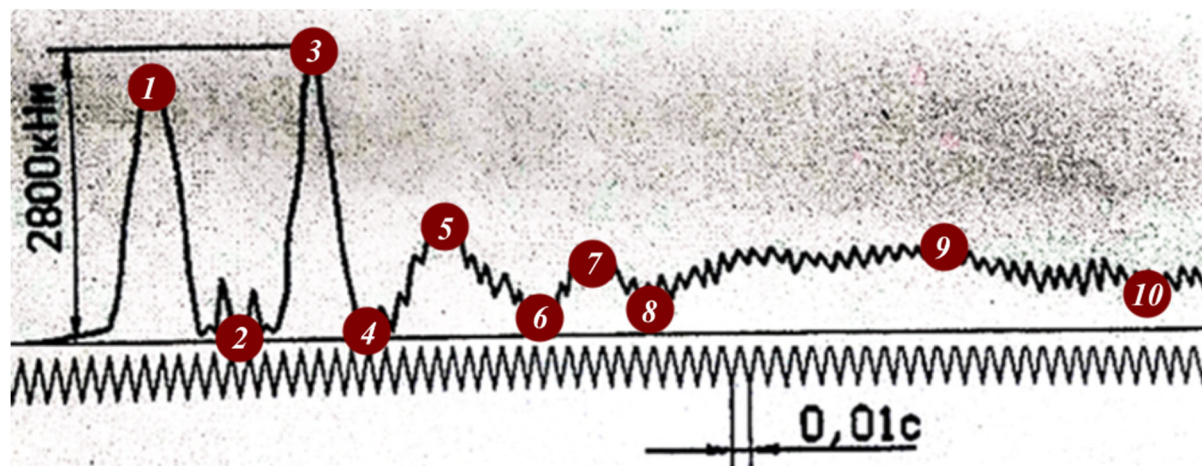


Рисунок 1. Осциллограмма крутильных колебаний (крутящий момент, измеренный на валу электродвигателя):

- 1 – максимум – $M_1 \approx 2\,500$ [кН·м];
- 2 – минимум – $M_2 \approx 100$ [кН·м];
- 3 – максимум – $M_3 \approx 2\,800$ [кН·м];
- 4 – минимум – $M_4 \approx 100$ [кН·м];
- 5 – максимум – $M_5 \approx 1\,100$ [кН·м];
- 6 – минимум – $M_6 \approx 200$ [кН·м];
- 7 – максимум – $M_7 \approx 800$ [кН·м];
- 8 – минимум – $M_8 \approx 300$ [кН·м];
- 9 – максимум – $M_9 \approx 900$ [кН·м];
- 10 – минимум – $M_{10} \approx 300$ [кН·м]

Выполнена расшифровка осциллограммы [1]: максимальный момент $M_{эд\,max} \approx 2\,800$ [кН·м]; установившийся момент $M_{эд\,уст} \approx 600$ [кН·м]; продолжительность захвата заготовки рабочими валками $T_{зах} \approx 0,06$ [с]; длительность переходного процесса $T_{пп} \approx 0,5$ [с]; основная частота крутильных колебаний $\nu \approx 12$ [Гц].

Коэффициент динамичности

$$K_d = \frac{M_{эд\,max}}{M_{эд\,уст}} \approx 4,7.$$

Момент прокатки (на оба рабочих валка)

$$M_{п} = i M_{эд\,уст} = 1\,800 \times 10^3 \text{ [Н·м]}.$$

где $i \approx 3$ – передаточное число редуктора.

В настоящей научной статье авторы ставят перед собой задачу полной обработки осциллограммы согласно ГОСТ 25.101 – 83 (Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов) с целью выявления амплитудных и средних значений циклов нагружения вала электродвигателя крутящим моментом при прокатке полосы 1,2×1250 из стали ЗКП в черновой клети №5 НШС 2000 НЛМК.

Среднеарифметическое значение экстремумов

$$mean(M) = \frac{\sum_{i=1}^{10} M_i}{10} = 910.$$

Значения экстремумов расположены в ряд по возрастанию для поиска медианы:

100	100	200	300	300	800	900	1 100	2 500	2 800
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------	-------	-------

Количество точек экстремумов равно десяти (четное число), поэтому медиана экстремумов вычислена как среднее арифметическое двух чисел, находящихся в середине ряда:

$$median(M) = \frac{300 + 800}{2} = 550.$$

В программной среде MathCAD построена диаграмма экстремумов, на которой видно, что график $M_{индекс}$ пересекает уровень $mean(M)$ в пяти точках (рис. 2).

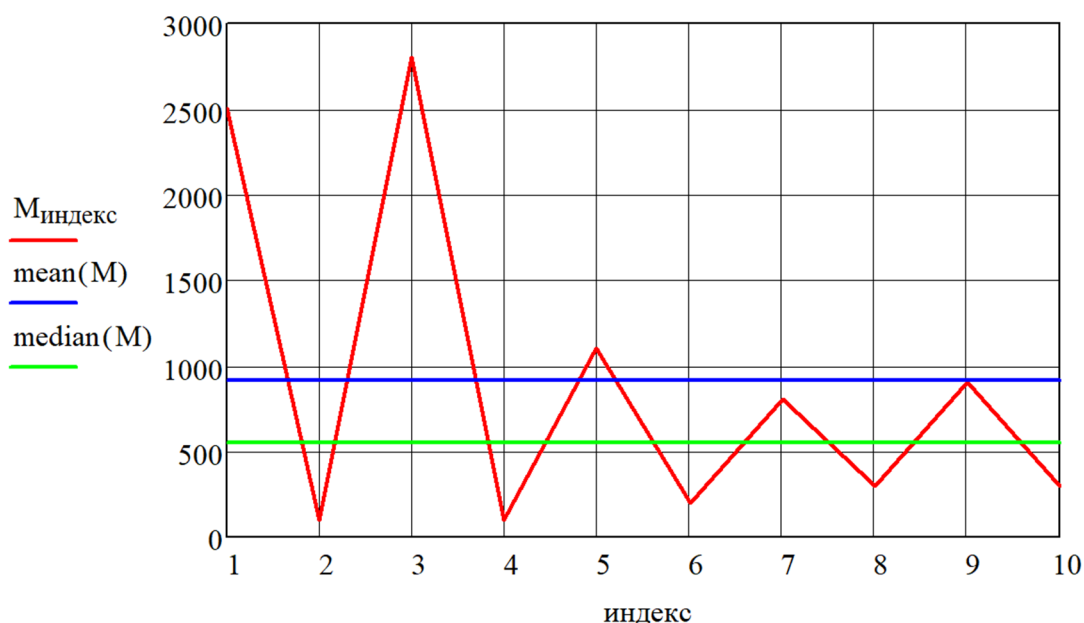


Рисунок 2. Диаграмма экстремумов:

$M_{индекс} - M_i$ [кН · м];
индекс – i

Вычислен коэффициент нерегулярности процесса нагружения как отношение числа точек пересечения графиком $M_{индекс}$ уровня $mean(M)$ к числу точек экстремумов:

$$\chi = \frac{5}{10} = 0,5.$$

Условие применимости метода экстремумов выполняется:

$$0,5 \leq \chi \leq 1.$$

Согласно методу экстремумов рассмотрению подлежат как максимумы, расположенные выше уровня $median(M)$, так и минимумы, расположенные ниже уровня $median(M)$ (табл. 1).

Вычислены амплитуды полуциклов нагружения по формуле

$$M_{ai} = |M_i - median(M)|.$$

Таблица 1. Результат обработки осциллограммы методом экстремумов

i	M_i [кН · м]	M_{ai} [кН · м]
1	2 500	1 950
2	100	450
3	2 800	2 250

4	100	450
5	1 100	550
6	200	350
7	800	250
8	300	250
9	900	350
10	300	250

Условие применимости метода максимумов выполняется:

$$0,5 \leq \chi \leq 1.$$

Согласно методу максимумов, рассмотрены только те максимумы, которые расположены выше уровня $median(M)$ (табл. 2).

Вычислены амплитуды циклов нагружения по формуле

$$M_{ai} = M_i - median(M).$$

Таблица 2. Результат обработки осциллограммы методом максимумов

i	M_i [кН · м]	M_{ai} [кН · м]
1	2 500	1 950
2	2 800	2 250
3	1 100	550
4	800	250
5	900	350

Условие применимости метода минимумов выполняется:

$$0,5 \leq \chi \leq 1.$$

Согласно методу минимумов, рассмотрены только те минимумы, которые расположены ниже уровня $median(M)$ (табл. 3).

Вычислены амплитуды циклов нагружения по формуле

$$M_{ai} = median(M) - M_i.$$

Таблица 3. Результат обработки осциллограммы методом минимумов

i	M_i [кН · м]	M_{ai} [кН · м]
1	100	450
2	100	450
3	200	350
4	300	250
5	300	250

Условие применимости однопараметрического метода размахов не выполняется:

$$0,8 \leq \chi \leq 1.$$

Условие применимости двухпараметрического метода размахов выполняется:

$$0,5 \leq \chi \leq 1.$$

Согласно методу размахов, учтены как восходящие, так и нисходящие размахи (табл.

4).

Вычислены амплитуды размахов (полуциклов) по формуле

$$M_{ai} = \frac{|M_i - M_{i+1}|}{2}.$$

Вычислены средние значения размахов (полуциклов) по формуле

$$M_{mi} = \frac{M_i + M_{i+1}}{2}.$$

Таблица 4. Результат обработки осциллограммы методом размахов

i	M_i [кН · м]	M_{i+1} [кН · м]	M_{ai} [кН · м]	M_{mi} [кН · м]
1	2 500	100	1 200	1 300
2	100	2 800	1 350	1 450
3	2 800	100	1 350	1 450
4	100	1 100	500	600
5	1 100	200	450	650
6	200	800	300	500
7	800	300	250	550
8	300	900	300	600
9	900	300	300	600

Условие применимости метода полных циклов выполняется:

$$0 \leq \chi \leq 1.$$

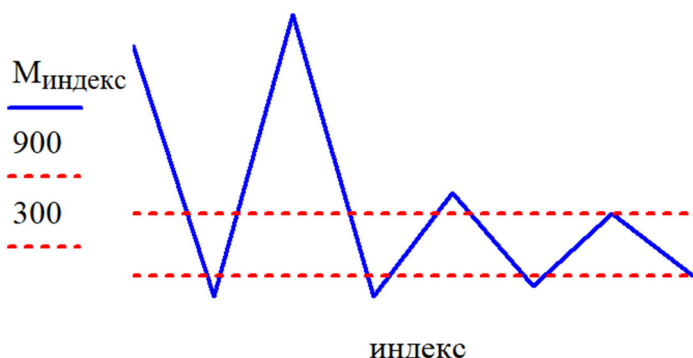
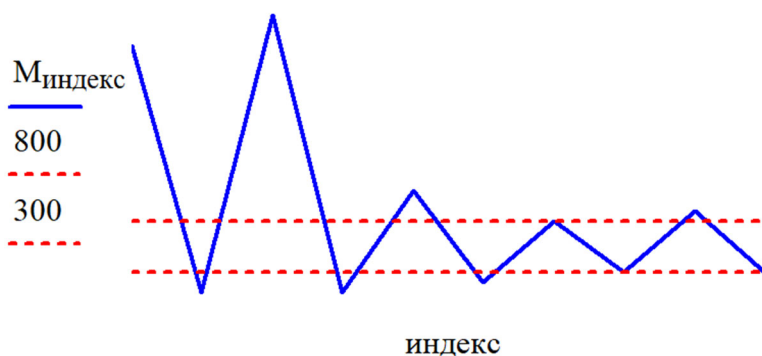
Последовательно выделены, согласно методу полных циклов, полные циклы, начиная с самого мелкого и заканчивая самым крупным (рис. 3, табл. 5).

Вычислены амплитуды циклов по формуле

$$M_{ai} = \frac{|M_i - M_{i+1}|}{2}.$$

Вычислены средние значения циклов по формуле

$$M_{mi} = \frac{M_i + M_{i+1}}{2}.$$



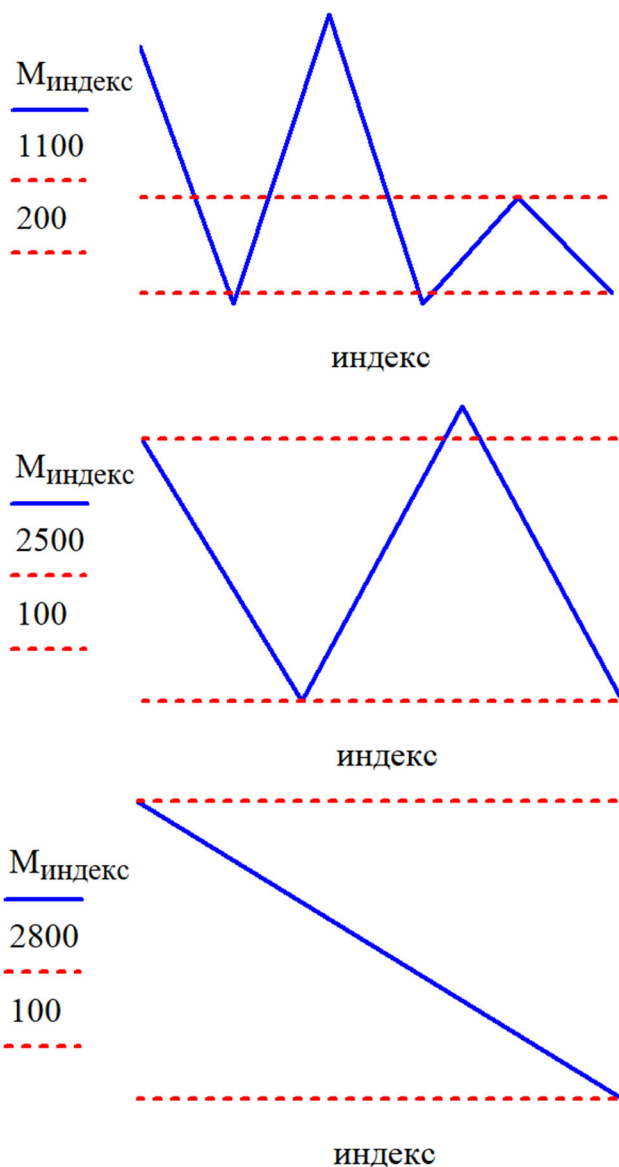


Рисунок 3. Выделение полных циклов на осциллограмме:

$M_{индекс} - M_i$ [кН · м];
 индекс – i

Таблица 5. Результат обработки осциллограммы методом полных циклов

i	M_i [кН · м]	M_{i+1} [кН · м]	M_{ai} [кН · м]	M_{mi} [кН · м]
1	800	300	250	550
2	900	300	300	600
3	1 100	200	450	650
4	2 500	100	1 200	1 300
5	2 800	100	1 350	1 450

Приведение асимметричных циклов нагружения к эквивалентным симметричным осуществляют по формуле

$$M_{прив. ai} = \begin{cases} M_{ai} + \Psi M_{mi} & \text{при } M_{mi} > 0 \\ M_{ai} & \text{при } M_{mi} \leq 0 \end{cases}$$

где Ψ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла нагружения.

Коэффициент Ψ для сталей выбирают по ГОСТ 25.504 – 82 (Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости).

Выводы:

Все методы схематизации, изложенные в ГОСТ 25.101 – 83, в равной степени применимы к процессам нагружения с коэффициентом нерегулярности $\chi = 1$. В нашем случае ($\chi = 0,5$) результаты обработки производственной осциллограммы, полученные с применением метода экстремумов, метода максимумов, метода минимумов, метода размахов и метода полных циклов, сильно различаются – наилучший результат (согласно ГОСТ 25.101 – 83) дает метод полных циклов, поскольку из вышеперечисленных только этот метод учитывает как основные, так и наложенные циклы.

Заключение:

Результат обработки производственной осциллограммы по методу полных циклов может быть использован, например, для расчетной оценки циклической прочности зубьев вала-шестерни редуктора пятой клетки НШС 2000 НЛМК [2].

Дальнейшее совершенствование программного обеспечения для цифровой обработки осциллограммы (с выявлением амплитуд и средних значений циклов нагрузки) будет способствовать более глубокому внедрению в производство нового метода фазохронометрической диагностики технического состояния прокатного оборудования [3].

Список литературы:

1. Мальцев А.А., Филатов А.А. Оценка уровня крутильных колебаний в приводе клетки № 5 непрерывного широкополосного стана 2000 методом компьютерного моделирования // Заготовительные производства в машиностроении, 2024. – Том 22, №9. – С. 417 – 425.
2. Яковлев Р.А. Ограничение динамических нагрузок в металлургических машинах: учебное пособие по курсу «Основы динамики металлургических машин» – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. – 36 с.
3. Скрипка В.Л., Минязева Л.Х. Особенности измерительных сигналов при фазохронометрической диагностике главного привода прокатного стана // Заготовительные производства в машиностроении, 2019. – Том 17. № 8. – С. 376 – 381.

References:

1. Maltsev A.A., Filatov A.A. Assessment of the level of torsional vibrations in the drive of crate No. 5 of the continuous broadband mill 2000 by computer modeling // Procurement production in mechanical engineering, 2024. – Volume 22, №9. – Pp. 417 - 425.
2. Yakovlev R.A. Limitation of dynamic loads in metallurgical machines: a textbook on the course "Fundamentals of dynamics of metallurgical machines" – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 1990. – 36 p.
3. Skripka V.L., Minyazeva L.H. Features of measuring signals in phasochronometric diagnostics of the main drive of a rolling mill // Procurement production in mechanical engineering, 2019. – Volume 17. № 8. – Pp. 376 - 381.