



УДК 621.31:621.771.06-88

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ОСЦИЛЛОГРАММЫ  
КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГЛАВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В СРЕДЕ MATHCAD****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**

Главные электроприводы металлургических машин испытывают значительные динамические перегрузки крутильно-колебательного характера, усугубляющие износ узлов трения и вызывающие усталостное разрушение деталей. Поломки деталей электроприводов часто приводят к значительным убыткам, связанным как с дороговизной и трудоемкостью ремонтных работ, так и с потерями от долгого простоя высокопроизводительного оборудования.

Неоспоримым критерием истины в исследовательской деятельности ученого-металлурга является натурный эксперимент в заводских условиях на работающем производственном оборудовании. Только тензометрические испытания с регистрацией амплитуд механических колебаний позволяют получить достаточно точную информацию о степени нагружения деталей.

В статье рассмотрены особенности компьютерной обработки в среде MathCAD осциллограммы крутильных колебаний, возникающих в главном электроприводе металлургической машины, методом полных циклов с учетом ГОСТ 25.101-83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов».

**Ключевые слова:** осциллограмма, электропривод, MathCAD, металлургия, ГОСТ 25.101-83, крутильные колебания.

**RESEARCH OF METHODS OF PROCESSING WAVEFORM TORSIONAL  
VIBRATION OF THE MAIN ELECTRIC DRIVE OF METALLURGICAL  
MACHINES IN MATHCAD****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**

The main electric drives of metallurgical machines experience significant dynamic overloads of torsional-oscillatory nature, aggravating the wear of friction units and causing

fatigue destruction of parts. Breakdowns of parts of electric drives often lead to significant losses associated with both the high cost and complexity of repairs, and with losses from long downtime of high-performance equipment.

The indisputable criterion of truth in the research activities of a scientist-Metallurgist is a full-scale experiment in factory conditions on working production equipment. Only strain tests with registration of amplitudes of mechanical vibrations allow to obtain sufficiently accurate information about the degree of loading of parts.

The article deals with the features of computer processing in the MathCAD environment of the torsional oscillogram arising in the main electric drive of a metallurgical machine by the method of full cycles taking into account GOST 25.101-83 "Calculations and strength tests. Methods of schematization of random processes of loading of elements of machines and designs and statistical representation of results".

---

**Keywords:** oscillogram, electric drive, MathCAD, metallurgy, GOST 25.101-83, torsional oscillations.

---

### Введение

Тензометрическая осциллограмма крутильных колебаний содержит ценную информацию о характере и параметрах нагружения крутящим моментом исследуемой детали главного электропривода металлургической машины. Такая информация, представленная в виде блока нагружения, необходима для дальнейшего расчета опасного сечения рассматриваемой детали на циклическую (усталостную) прочность.

Цель исследования — выбор наиболее подходящего метода для компьютерной обработки тензометрической осциллограммы в среде MathCAD с регистрацией параметров (амплитуд и средних значений) циклов крутильно-колебательного переходного процесса, вызванного как технологическими причинами, так и неустойчивой работой электродвигателя в процессе эксплуатации металлургического оборудования [1-3].

### Материалы и методы исследования

Материалом исследования является имитационная осциллограмма нагружения детали (рис. 1).

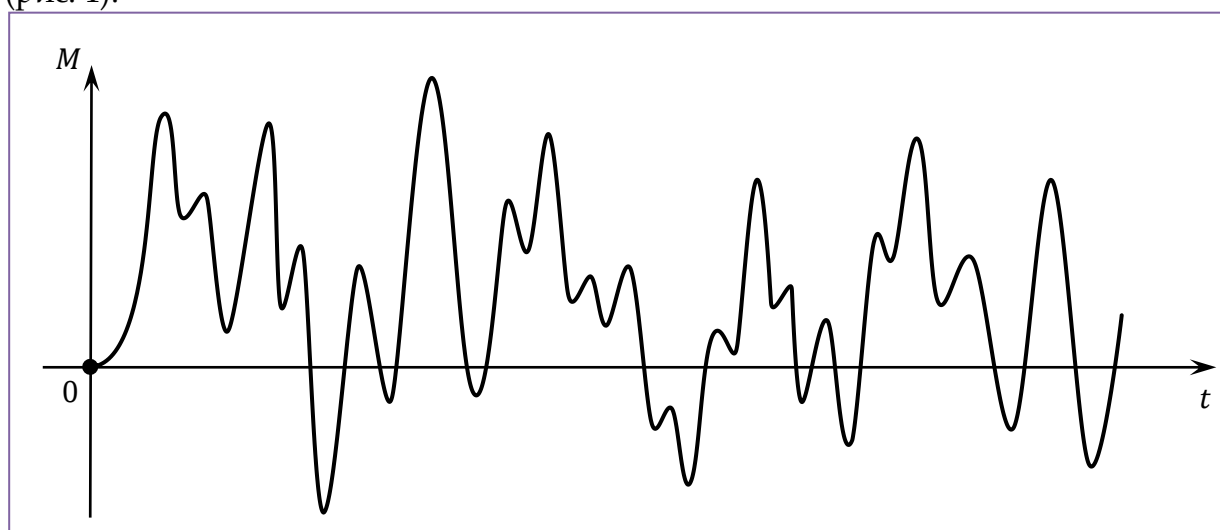


Рис. 1. Фрагмент имитационной осциллограммы:

$M$  – крутящий момент [кН·м];  $t$  – время [с]

Для подготовки материала автор придерживался следующего порядка, установленного в ГОСТ 25.101-83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов»:

1. Диапазон изменения крутящего момента от наибольшей  $M_{\max}$  до наименьшей  $M_{\min}$  величины был разбит на классы одинаковой ширины

$$\Delta = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{(14 \dots 32)},$$

причем величины крутящего момента, попавшие на границу разбиения, были отнесены к классу с большим номером (рис. 2).

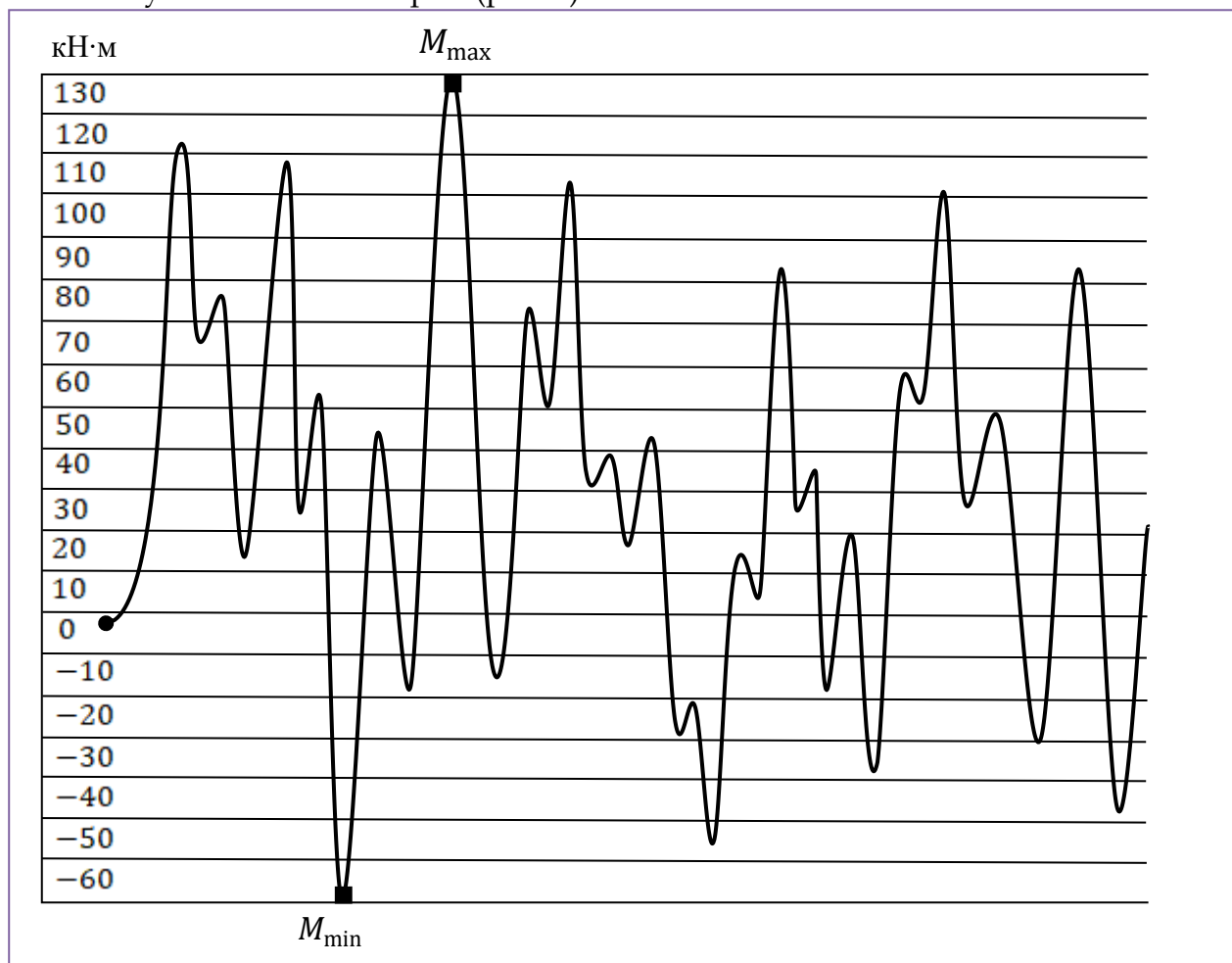


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы:

$M_{\max}$  — абсолютный максимум крутящего момента [кН·м];

$M_{\min}$  — абсолютный минимум крутящего момента [кН·м]

2. Выделены экстремумы, при этом были проигнорированы смежные максимумы и минимумы, относящиеся к одному классу (рис. 3).

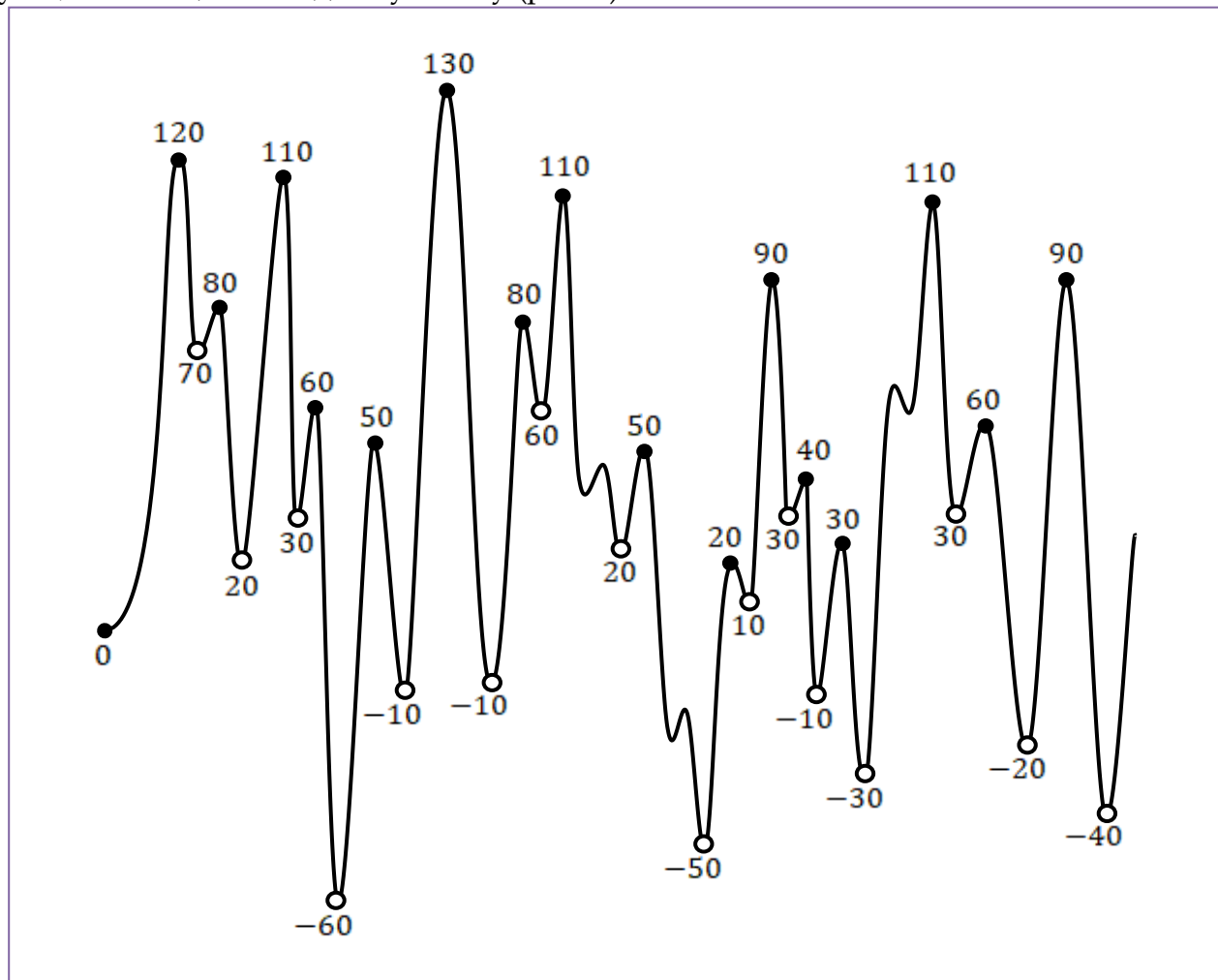


Рис. 3. Фрагмент осциллограммы:  
● – максимумы; ○ – минимумы

3. Вычислено среднеарифметическое значение\* крутящего момента

$$M_{\text{ср}} = \frac{\sum M_i}{n_3} = \frac{120 + 70 + \dots + (-40)}{32} \approx 40 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

где  $n_3$  – число экстремумов (максимумов и минимумов).

4. Вычислена медиана\* экстремумов  $Me = 35 \text{ кН}\cdot\text{м}$  – значение крутящего момента, соответствующее 50% вероятности распределения экстремумов.

5. Вычислен коэффициент нерегулярности процесса нагружения как отношение числа пересечений нуля к числу экстремумов по формуле

$$\chi = \frac{n_0}{n_3} = \frac{23}{32} = 0,7,$$

где  $n_0$  – число пересечений осциллограммой уровня среднеарифметического значения крутящего момента  $M_{\text{ср}}$  (рис. 4).

\* Встроенная в MathCAD статистическая функция  $mean(A, B, C, \dots)$  возвращает среднеарифметическое значение элементов  $A, B, C \dots$

\* Встроенная в MathCAD статистическая функция  $median(A, B, C, \dots)$  возвращает медиану элементов  $A, B, C \dots$

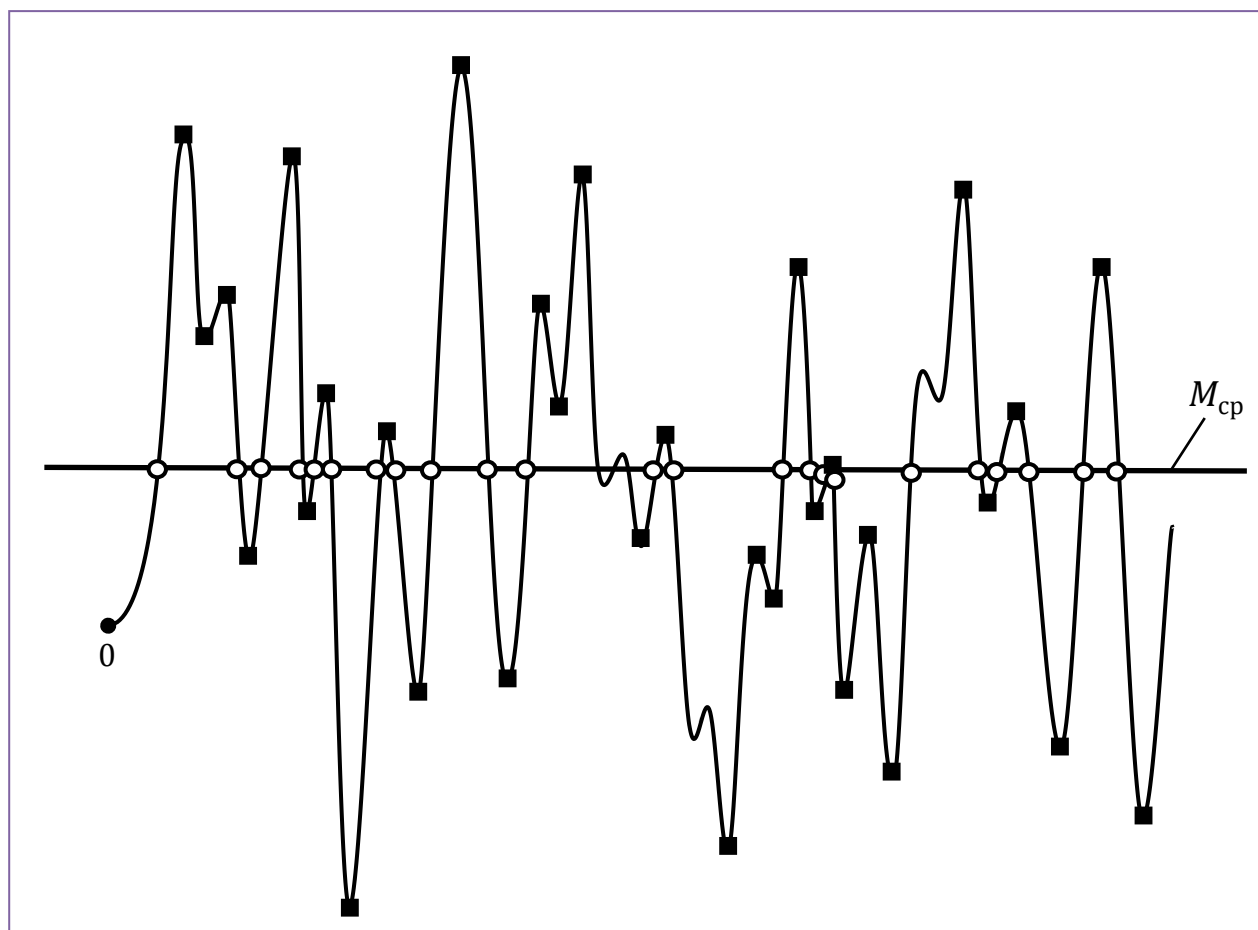


Рис. 4. К вычислению коэффициента  $\chi$ :  
 ○ – точка пересечения осциллограммы  
 и уровня среднего момента; ■ – экстремум

Методы исследования — это однопараметрический (параметр  $M_a$ ) и двухпараметрический (параметры  $M_a$  и  $M_m$ ) методы выделения циклов на осциллограмме нагружения (рис. 5).

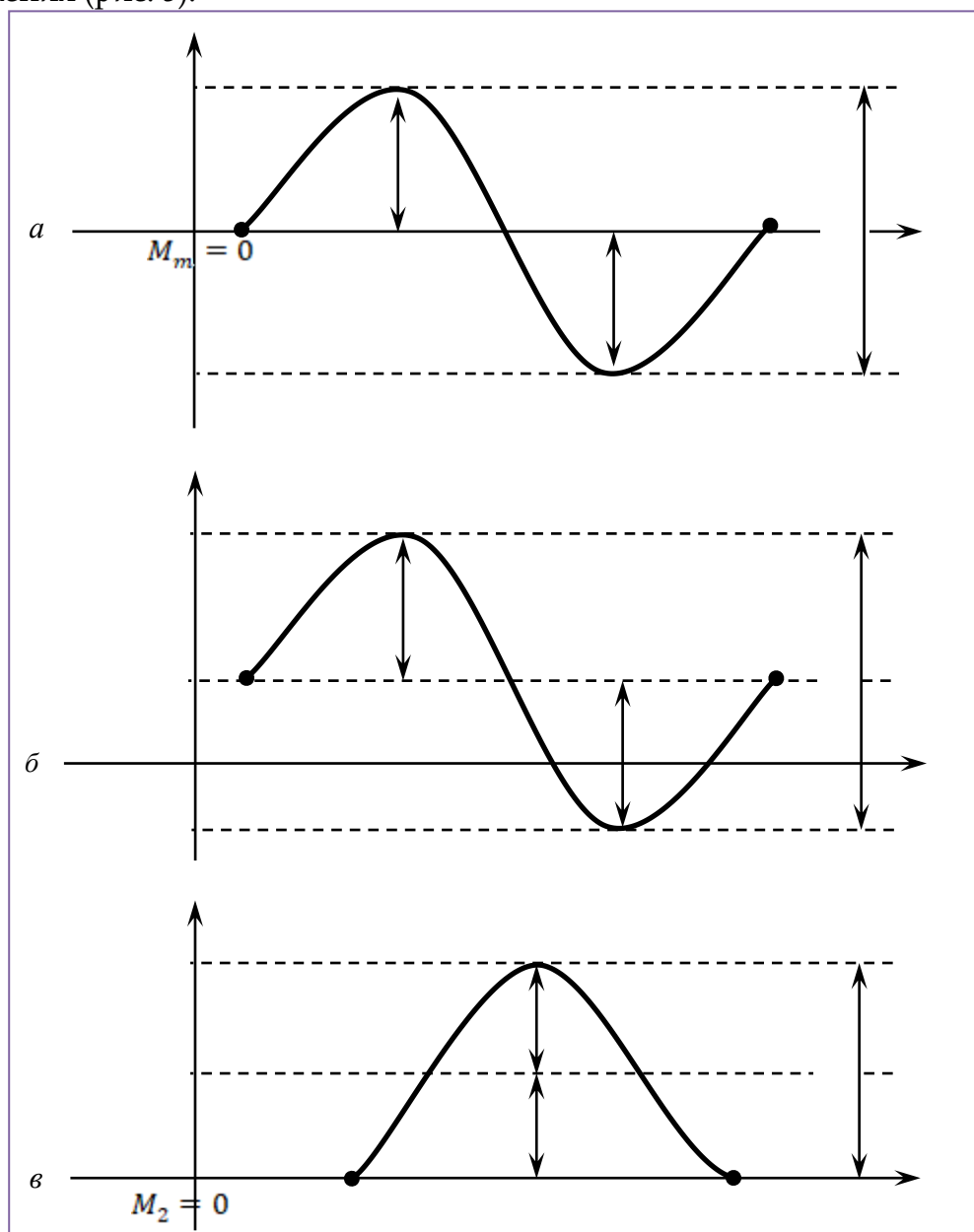


Рис. 5. Виды циклов\* нагружения крутящим моментом:  
 а — симметричный; б — асимметричный; в — пульсирующий;  
 $M$  — крутящий момент [кН·м];  $t$  — время [с];  
 $M_1, M_2$  — экстремумы;  $M_{1-2}$  — размах;  
 $M_a$  — амплитуда;  $M_m$  — среднее значение цикла

\* Цикл нагружения — совокупность последовательных значений крутящих моментов за один период их изменения при регулярном нагружении.

### Результаты и их обсуждение

Сначала были апробированы следующие однопараметрические методы: метод экстремумов ( $0,5 \leq \chi \leq 1$ ), метод максимумов ( $0,5 \leq \chi \leq 1$ ) и метод минимумов ( $0,5 \leq \chi \leq 1$ ).

В результате обработки осциллограммы методом экстремумов (рис. 6) были выделены все положительные максимумы (выше уровня медианы  $Me$ ) и все отрицательные минимумы (ниже уровня медианы  $Me$ ).

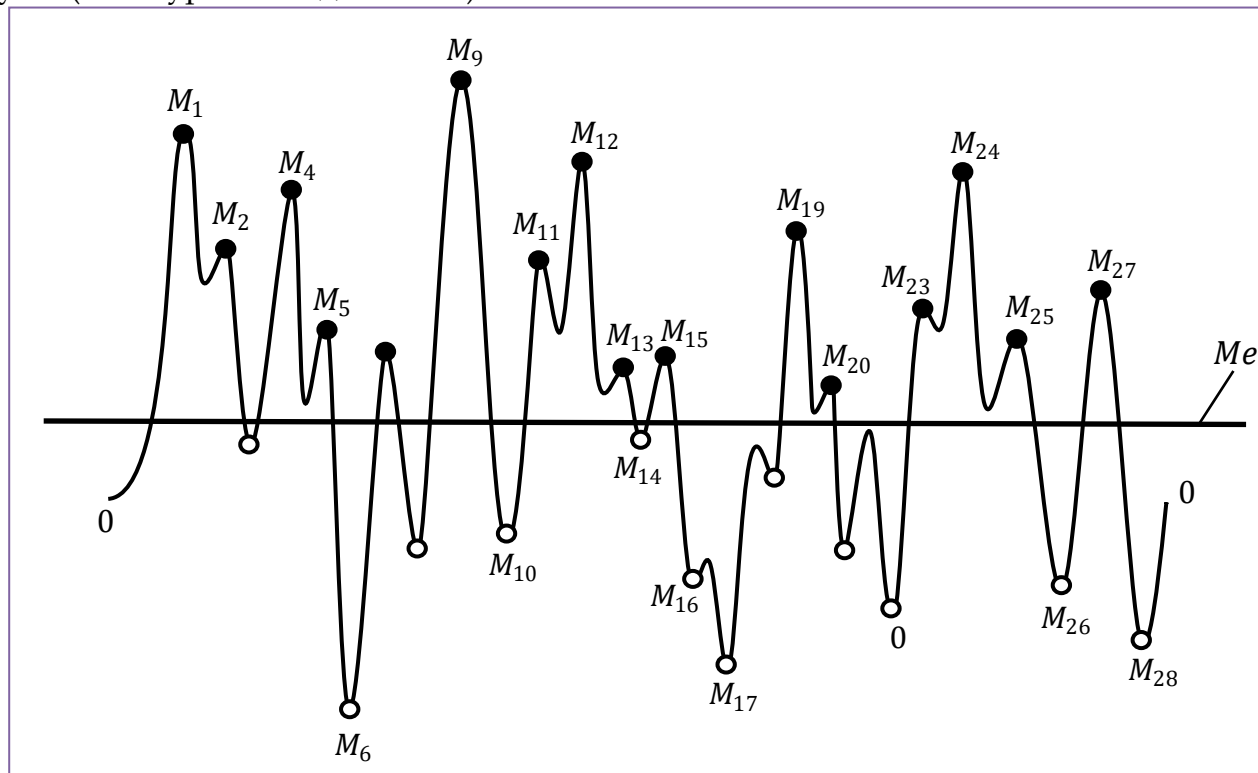


Рис. 6. Обработка методом экстремумов:

$M_1, M_2, \dots, M_{28}$  – экстремумы [кН·м];

● – положительные максимумы;

○ – отрицательные минимумы

Зарегистрированы амплитуды полуциклов нагружения

$$M_{a1} = |M_1 - Me|;$$

$$M_{a2} = |M_2 - Me|;$$

⋮

$$M_{a28} = |M_{28} - Me|.$$

В результате обработки осциллограммы методом максимумов были рассмотрены только положительные максимумы.

Зарегистрированы амплитуды циклов нагружения

$$M_{a1} = M_1 - Me;$$

$$M_{a2} = M_2 - Me;$$

$$M_{a3} = M_4 - Me;$$

$$M_{a4} = M_5 - Me;$$

$$M_{a5} = M_7 - Me;$$

$$M_{a6} = M_9 - Me;$$

$$M_{a7} = M_{11} - Me;$$

$$M_{a8} = M_{12} - Me;$$

$$M_{a9} = M_{13} - Me;$$

$$M_{a10} = M_{15} - Me;$$

$$M_{a11} = M_{19} - Me;$$

$$M_{a12} = M_{20} - Me;$$

$$M_{a13} = M_{23} - Me;$$

$$M_{a14} = M_{24} - Me;$$

$$M_{a15} = M_{25} - Me;$$

$$M_{a16} = M_{27} - Me.$$

В результате обработки осциллограммы *методом минимумов* были рассмотрены только отрицательные минимумы.

Зарегистрированы амплитуды циклов нагружения

$$M_{a1} = Me - M_3;$$

$$M_{a2} = Me - M_6;$$

$$M_{a3} = Me - M_8;$$

⋮

$$M_{a10} = Me - M_{22};$$

$$M_{a11} = Me - M_{26};$$

$$M_{a12} = Me - M_{28}.$$

Затем были апробированы такие двухпараметрические методы, как метод размахов ( $0,5 \leq \chi \leq 1$ ) и метод полных циклов ( $0 \leq \chi \leq 1$ ).

В результате применения *метода размахов* были зарегистрированы как амплитуды, так и средние значения размахов (рис. 7).

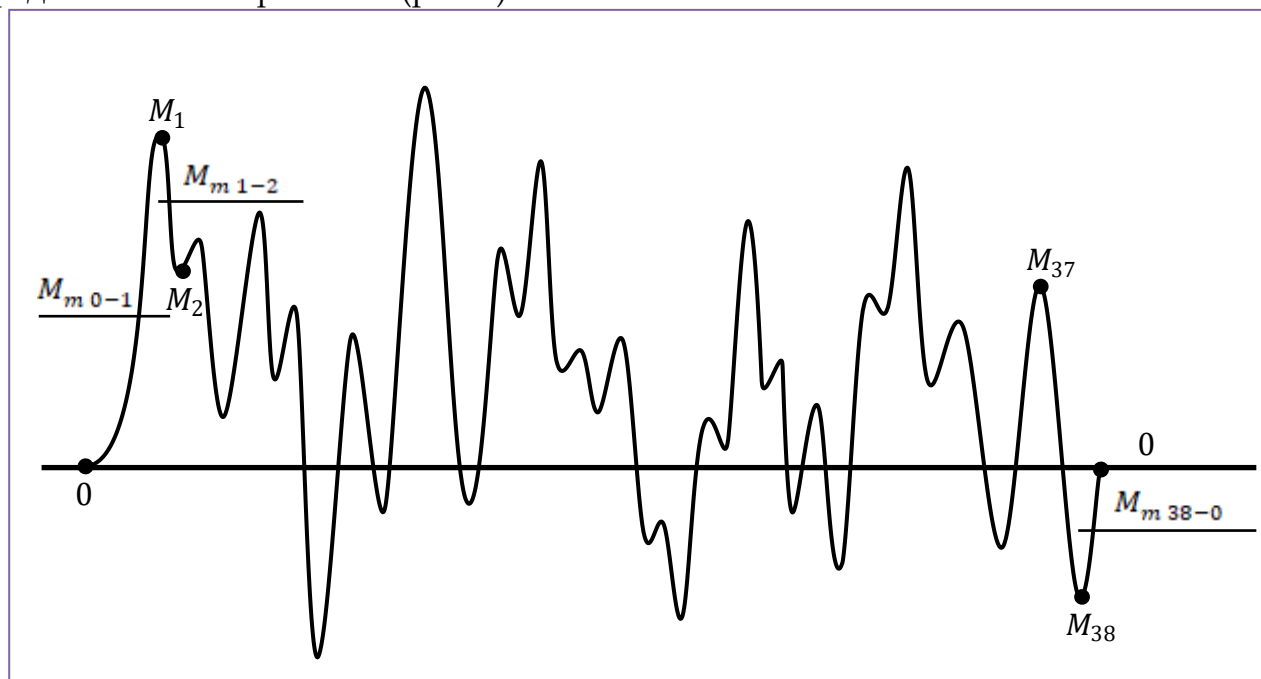


Рис. 7. Обработка методом размахов:

$M_1, M_2, \dots, M_{38}$  – экстремумы [кН·м];

$M_{m0-1}, M_{m1-2}, \dots, M_{m38-0}$  –  
средние значения размахов [кН·м];

Амплитуды и средние значения полуциклов нагружения

$$M_{a0-1} = \frac{|M_0 - M_1|}{2}; \quad M_{m0-1} = \frac{M_0 + M_1}{2};$$

$$M_{a1-2} = \frac{|M_1 - M_2|}{2}; \quad M_{m1-2} = \frac{M_1 + M_2}{2};$$

⋮

$$M_{a38-0} = \frac{|M_{38} - M_0|}{2}; \quad M_{m38-0} = \frac{M_{38} + M_0}{2}.$$

В результате применения метода полных циклов были поэтапно выделены циклы, начиная с мелких и заканчивая самым крупным.

Амплитуды и средние значения полных циклов нагружения, зарегистрированные на первом этапе и исключенные из дальнейшего рассмотрения (рис. 8):

$$M_{a\ 2-3} = \frac{|M_0 - M_1|}{2}; \quad M_{m\ 0-1} = \frac{M_0 + M_1}{2};$$

$$M_{a\ 16-17} = \frac{|M_{16} - M_{17}|}{2}; \quad M_{m\ 16-17} = \frac{M_{16} + M_{17}}{2};$$

$$M_{a\ 20-21} = \frac{|M_{20} - M_{21}|}{2}; \quad M_{m\ 20-21} = \frac{M_{20} + M_{21}}{2};$$

$$M_{a\ 23-24} = \frac{|M_{23} - M_{24}|}{2}; \quad M_{m\ 23-24} = \frac{M_{23} + M_{24}}{2};$$

$$M_{a\ 26-27} = \frac{|M_{26} - M_{27}|}{2}; \quad M_{m\ 26-27} = \frac{M_{26} + M_{27}}{2};$$

$$M_{a\ 31-32} = \frac{|M_{31} - M_{32}|}{2}; \quad M_{m\ 31-32} = \frac{M_{31} + M_{32}}{2}.$$

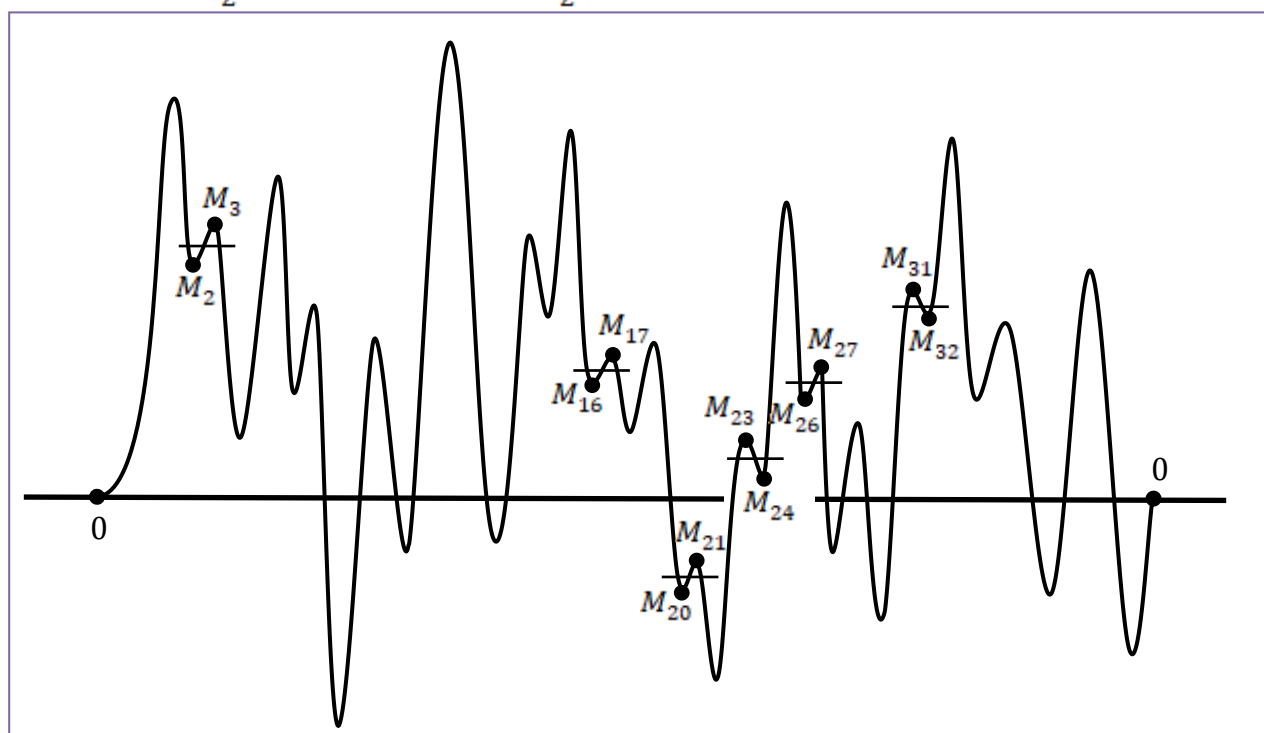


Рис. 8. Первый этап выделения полных циклов:

$M_2, M_3, \dots, M_{32}$  – экстремумы [кН·м];

$M_{2-3}, M_{16-17}, \dots, M_{31-32}$  – наименьшие размахи [кН·м]

Амплитуды и средние значения полных циклов нагружения, зарегистрированные на втором этапе и исключенные из дальнейшего рассмотрения (рис. 9):

$$\begin{aligned}
 M_{a\ 6-7} &= \frac{|M_0 - M_1|}{2}; \quad M_{m\ 0-1} = \frac{M_0 + M_1}{2}; \\
 M_{a\ 13-14} &= \frac{|M_{16} - M_{17}|}{2}; \quad M_{m\ 16-17} = \frac{M_{16} + M_{17}}{2}; \\
 M_{a\ 18-19} &= \frac{|M_{20} - M_{21}|}{2}; \quad M_{m\ 20-21} = \frac{M_{20} + M_{21}}{2}; \\
 M_{a\ 28-29} &= \frac{|M_{23} - M_{24}|}{2}; \quad M_{m\ 23-24} = \frac{M_{23} + M_{24}}{2}; \\
 M_{a\ 34-35} &= \frac{|M_{31} - M_{32}|}{2}; \quad M_{m\ 31-32} = \frac{M_{31} + M_{32}}{2}.
 \end{aligned}$$

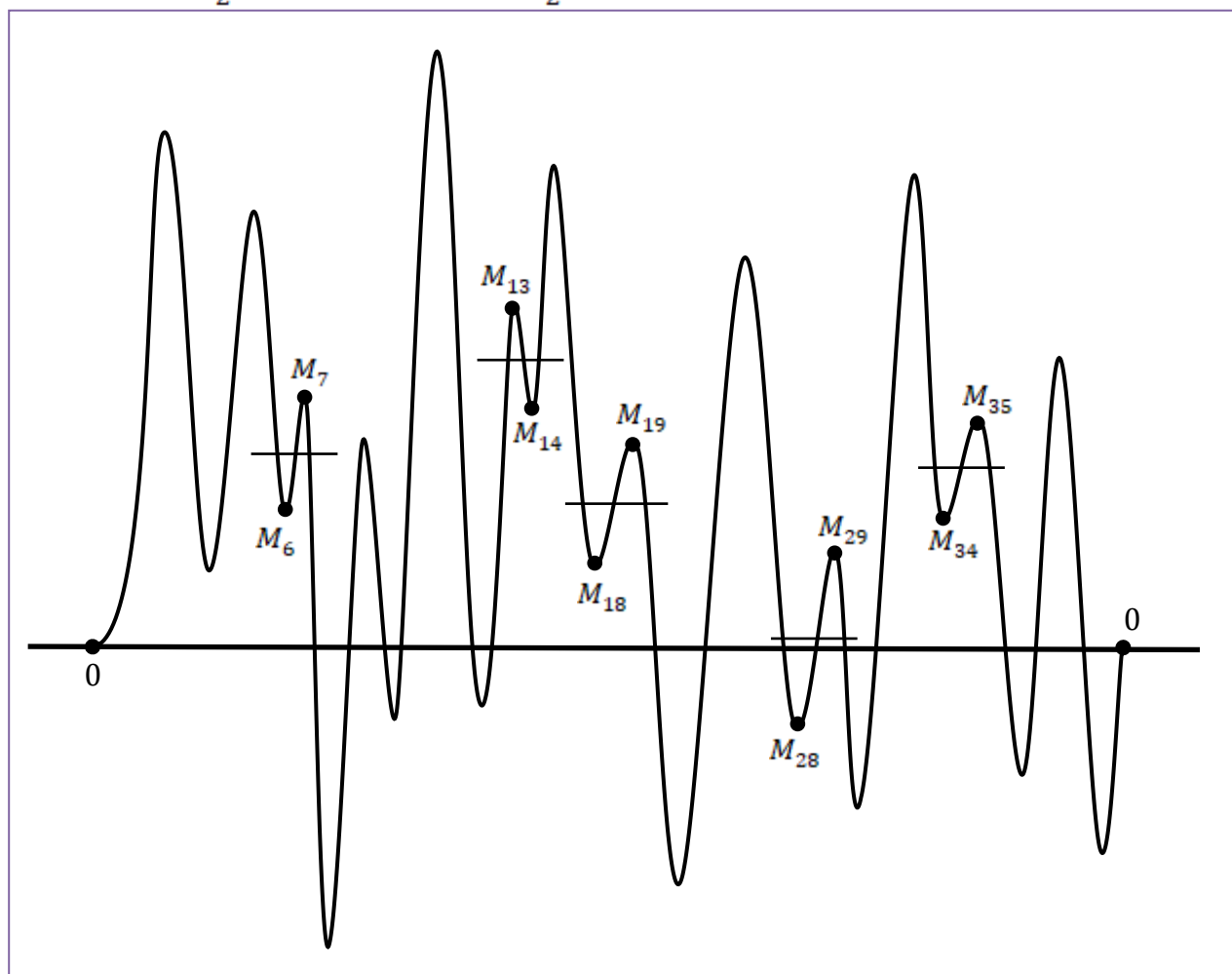


Рис. 9. Второй этап выделения полных циклов:

$M_6, M_7, \dots, M_{35}$  — экстремумы [кН·м];

$M_{6-7}, M_{13-14}, \dots, M_{34-35}$  — наименьшие размахи [кН·м]

Амплитуды и средние значения полных циклов нагружения, зарегистрированные на третьем этапе и исключенные из дальнейшего рассмотрения (рис. 10):

$$M_{a\ 4-5} = \frac{|M_4 - M_5|}{2}; \quad M_{m\ 4-5} = \frac{M_4 + M_5}{2};$$

$$M_{a\ 9-10} = \frac{|M_9 - M_{10}|}{2}; \quad M_{m\ 9-10} = \frac{M_9 + M_{10}}{2};$$

$$M_{a\ 36-37} = \frac{|M_{36} - M_{37}|}{2}; \quad M_{m\ 36-37} = \frac{M_{36} + M_{37}}{2}.$$

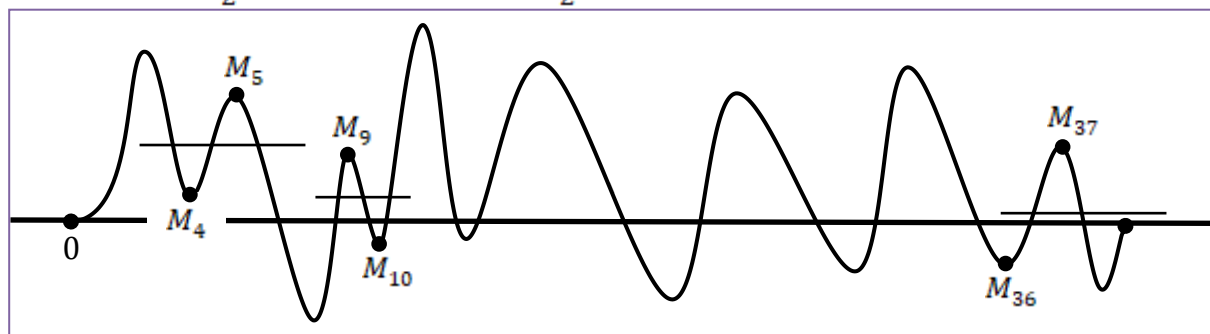


Рис. 10. Третий этап выделения полных циклов:  
 $M_{4-5}$ ,  $M_{9-10}$ ,  $M_{36-37}$  – наименьшие размахи [кН·м]

Амплитуды и средние значения полных циклов нагружения, зарегистрированные на четвертом этапе и исключенные из дальнейшего рассмотрения (рис. 11):

$$M_{a\ 12-15} = \frac{|M_{12} - M_{15}|}{2}; \quad M_{m\ 12-15} = \frac{M_{12} + M_{15}}{2};$$

$$M_{a\ 25-30} = \frac{|M_{25} - M_{30}|}{2}; \quad M_{m\ 25-30} = \frac{M_{25} + M_{30}}{2}.$$

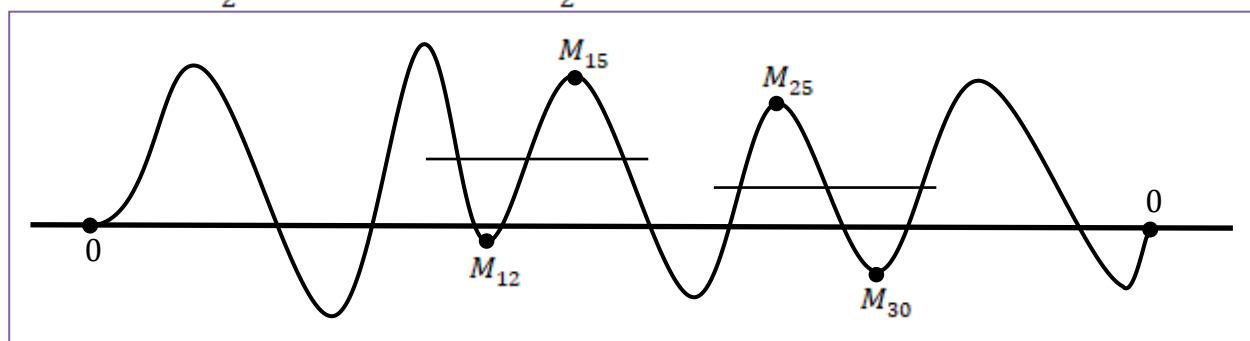


Рис. 11. Четвертый этап выделения полных циклов:  
 $M_{12-15}$ ,  $M_{25-30}$  – наименьшие размахи [кН·м]

Амплитуды и средние значения полных циклов нагружения, зарегистрированные на пятом этапе и исключенные из дальнейшего рассмотрения (рис. 12):

$$M_{a\ 1-8} = \frac{|M_1 - M_8|}{2}; \quad M_{m\ 1-8} = \frac{M_1 + M_8}{2};$$

$$M_{a\ 11-22} = \frac{|M_{11} - M_{22}|}{2}; \quad M_{m\ 11-22} = \frac{M_{11} + M_{22}}{2};$$

$$M_{a\ 33-38} = \frac{|M_{33} - M_{38}|}{2}; \quad M_{m\ 33-38} = \frac{M_{33} + M_{38}}{2}.$$

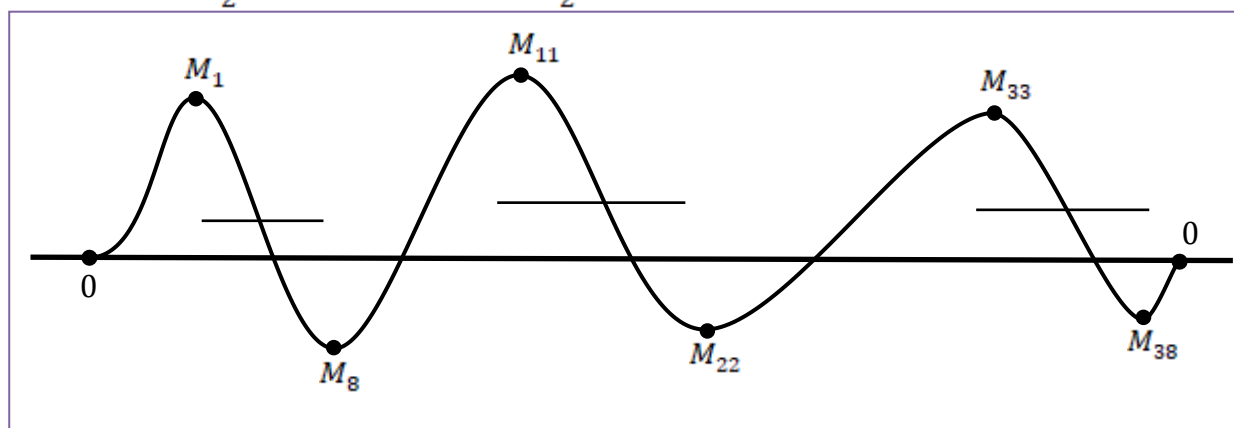


Рис. 12. Пятый этап выделения полных циклов:  
 $M_{1-8}$ ,  $M_{11-22}$ ,  $M_{33-38}$  – наименьшие размахи [кН·м]

Амплитуда и среднее значение цикла нагружения, зарегистрированные на шестом этапе (рис. 13):

$$M_{a\ 8-11} = \frac{|M_8 - M_{11}|}{2}; \quad M_{m\ 8-11} = \frac{M_8 + M_{11}}{2}.$$

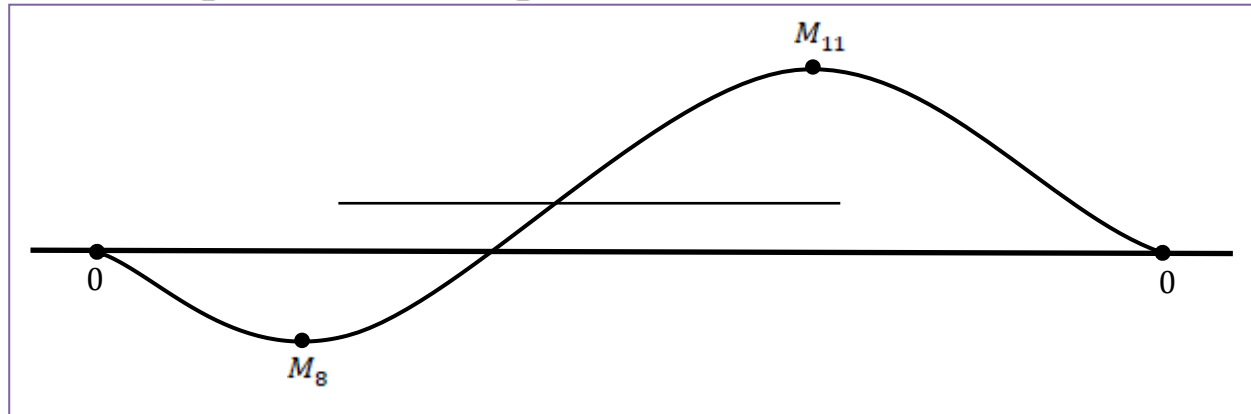


Рис. 13. Шестой этап выделения полных циклов:  
 $M_{8-11}$  – самый крупный цикл [кН·м]

**Выводы**

1. При реализации методов экстремумов, максимумов и минимумов не были учтены отрицательные максимумы и положительные минимумы, что привело к ошибке в регистрации циклов нагружения.

2. Метод размахов также привел к ошибке: не были зарегистрированы циклы со значительной амплитудой, на которые наложены учтенные мелкие циклы нагружения.

3. Был выбран наиболее подходящий для компьютерной обработки тензометрической осциллограммы в среде MathCAD метод выделения полных циклов, поскольку при его реализации учитываются как основные, так и наложенные циклы.

**Список литературы**

1. Подковырин Е.Я., Веренев В.В. Диагностическая информативность момента сил упругости в линии привода валков прокатного стана. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. №7. – С. 162 – 165.
2. Смирнов В.В., Яковлев Р.А. *Механика приводов прокатных станов* – М.: *Металлургия*, 1977. – 216 с.
3. Колесников А.Г., Яковлев Р.А., Мальцев А.А. *Технологическое оборудование прокатного производства* / А.Г. Колесников. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. – 158 с.

**References**

1. Podkovyryn E.J., Werenew V.V. Diagnostic information content of the moment of forces of elasticity in the line of drive of the rollers of the rolling mill. *Metallurgical and mining industry*. 2015. No. 7. – P. 162 – 165.
2. Smirnov V.V., Yakovlev R.A. *Mechanics of rolling mill drives* – M.: *Metallurgy*, 1977. – 216 p.
3. Kolesnikov A.G., Yakovlev R.A., Maltsev A A. *Technological equipment of rolling production* / A.G. Kolesnikov. M.: Publisher BMSTU. 2014. – 158s.