

УДК 621.31:621.771.06-88

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С
ВЫЯВЛЕНИЕМ СПЕКТРА НАПРЯЖЕНИЙ В ОПАСНОМ СЕЧЕНИИ
ВАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ****Андрей Анатольевич Мальцев**

доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Ирина Александровна Тарасенко**

старший преподаватель кафедры ФН-7 МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: iri-tarassenko@yandex.ru**Аннотация**

Предложено осуществлять цифровую обработку тензометрической осциллограммы крутящего момента, измеренного на валу электропривода металлургической машины, с выявлением спектра напряжений, возникающих в опасном сечении этого вала, что позволит установить степень опасности нагрузки по критерию превышения ею предела выносливости вала в опасном сечении.

Ключевые слова: электропривод, металлургия, осциллограмма, прочность.**DIGITAL PROCESSING OF STRAIN GAUGE DATA WITH THE
IDENTIFICATION OF A SPECTRUM OF STRESSES IN DANGEROUS
SECTION OF THE DRIVE SHAFT METALLURGICAL MACHINERY****Andrey A. Maltsev**

associate professor, Bauman Moscow State Technical University

ФН-7 and МТ-10 Departments

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Irina A. Tarasenko**

senior lecturer, Bauman Moscow State Technical University

ФН-7 Department

e-mail: iri-tarassenko@yandex.ru**ABSTRACT**

Proposed to carry out digital processing strain waveforms the torque measured on the shaft of the electric drive of metallurgical machines, with the identification of the range of stresses in dangerous section of the shaft that will allow you to establish the degree of danger of the load on the criterion of exceeding its endurance limit of the shaft in the threat section.

Keywords: electric drive, metallurgy, oscillogram, strength.

Введение

К безотказности электроприводов машин доменного, сталеплавильного и прокатного производств предъявляют самые высокие требования, поскольку даже незначительный простой оборудования доменных и сталеплавильных печей, многоклетевых прокатных станов всегда приводит к колоссальным финансовым потерям. Кроме того, в металлургическом производстве широко применяются грузоподъемные и транспортирующие машины, приводимые в движение от электродвигателей. Например, для подачи шихты на колошник доменной печи (рис. 1) необходим скиповый подъемник, в более современных конструкциях предусмотрен непрерывный конвейерный подъем шихты; задержка в загрузке шихты переводит доменную печь на работу в режиме «тихого хода» или вызывает ее полную остановку.

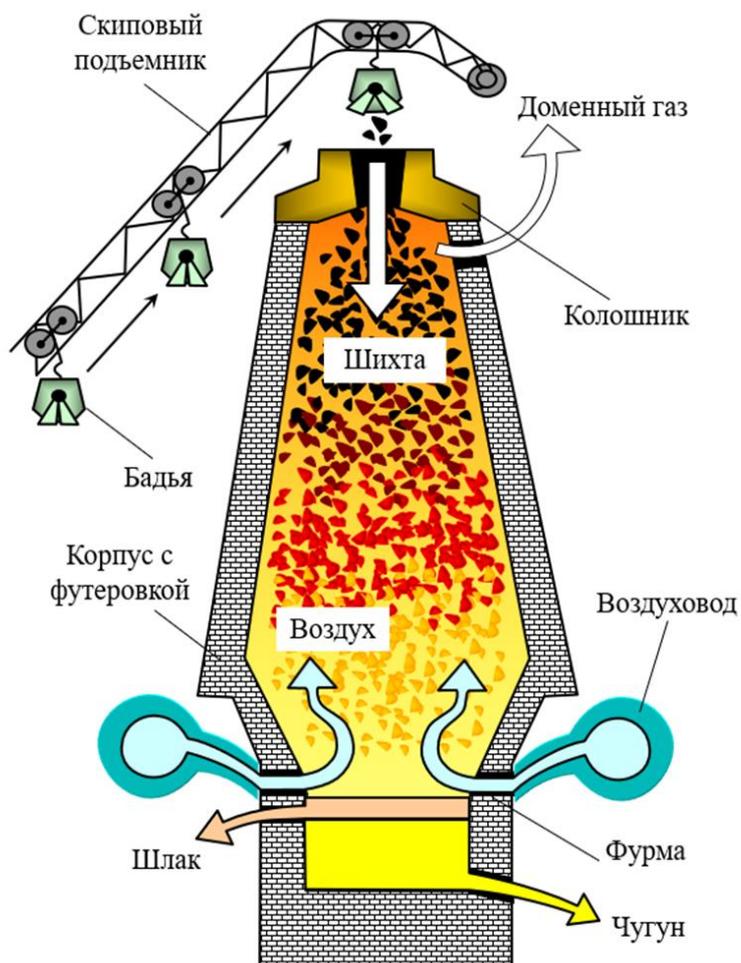


Рис. 1. Доменная печь

Оценка безотказности электропривода металлургической машины как сложной системы сводится к расчету безотказности отдельных элементов (деталей и узлов) с учетом резервирования, возможности быстрой замены или ремонта. Так, валопровод группового электропривода металлопрокатного стана (рис.2) состоит из большого количества валов, каждый из которых является достаточно ответственной деталью: выход из строя одного из валов может привести к серьезной производственной аварии [1].

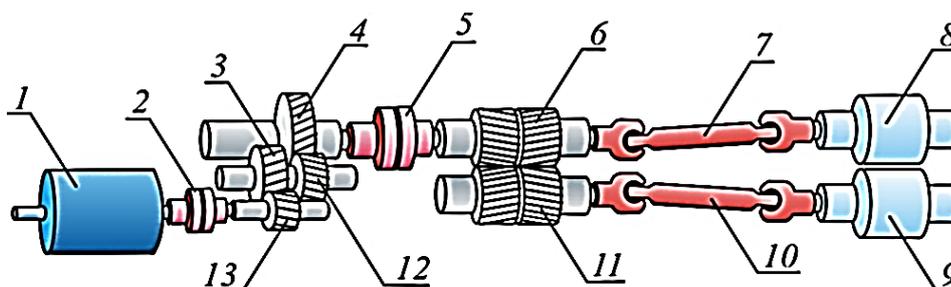


Рис. 2. Валопровод электропривода металлопрокатного стана:

- 1 – ротор электродвигателя; 2, 5 – муфты;
 3, 4 – зубчатые колеса редуктора;
 6, 11 – верхний и нижний шестеренные валки;
 7, 10 – верхний и нижний шпиндели;
 8, 9 – верхний и нижний рабочие валки;
 12, 13 – вал-шестерни редуктора

По мнению авторов, на металлопрокатных станах целесообразнее всего устанавливать синхронизированные по скорости вращения индивидуальные безредукторные электроприводы. Каждый такой электропривод, состоящий из тихоходного электродвигателя и предохранительного вала, приспособленного для бесконтактного измерения крутящего момента, будет вращать только один рабочий валок. Упрощенная конструкция электропривода не только повысит эксплуатационную надежность металлопрокатного стана, но и значительно уменьшит металлоемкость и габариты последнего.

Объект исследования – опасное поперечное сечение шпиндельного вала металлопрокатного стана (рис.3).

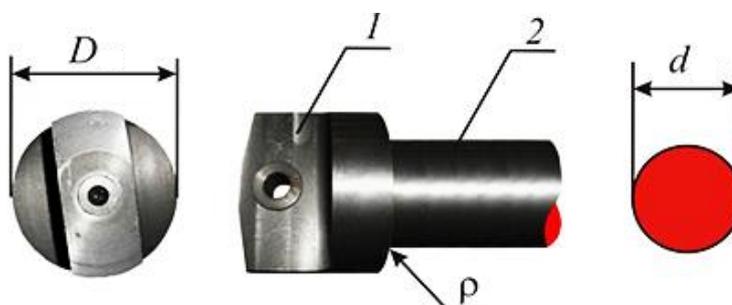


Рис. 3. Шпиндель металлопрокатного стана:

- 1 – лопасть шарнира; 2 – вал;
 материал – сталь 45;
 $D = 280$ мм – диаметр шарнира;
 $d = 180$ мм – диаметр опасного сечения вала;
 $\rho = 10$ мм – радиус галтели

Предмет исследования – касательные напряжения, возникающие в опасном поперечном сечении шпиндельного вала, передающего крутящий момент вдоль собственной геометрической оси в процессе прокатки металлической заготовки.

Цель исследования – построение по результатам цифровой обработки осциллограммы крутильных колебаний ранжированного по убыванию спектра касательных напряжений в опасном сечении шпиндельного вала.

Задачи исследования:

- ✓ обоснование выбора метода цифровой обработки осциллограммы;
- ✓ поиск экстремумов и нисходящих размахов на осциллограмме;
- ✓ вычисление амплитуд и средних значений циклов нагружения;

- ✓ вычисление предела выносливости вала в опасном сечении;
- ✓ перерасчет крутящих моментов в касательные напряжения;
- ✓ вычисление приведенных к симметричному циклу амплитуд;
- ✓ построение спектра касательных напряжений.

Материалы и методы исследования

Исходные тензометрические данные – имитационная осциллограмма крутящего момента, измеренного на валу электропривода металлургической машины (рис. 4).

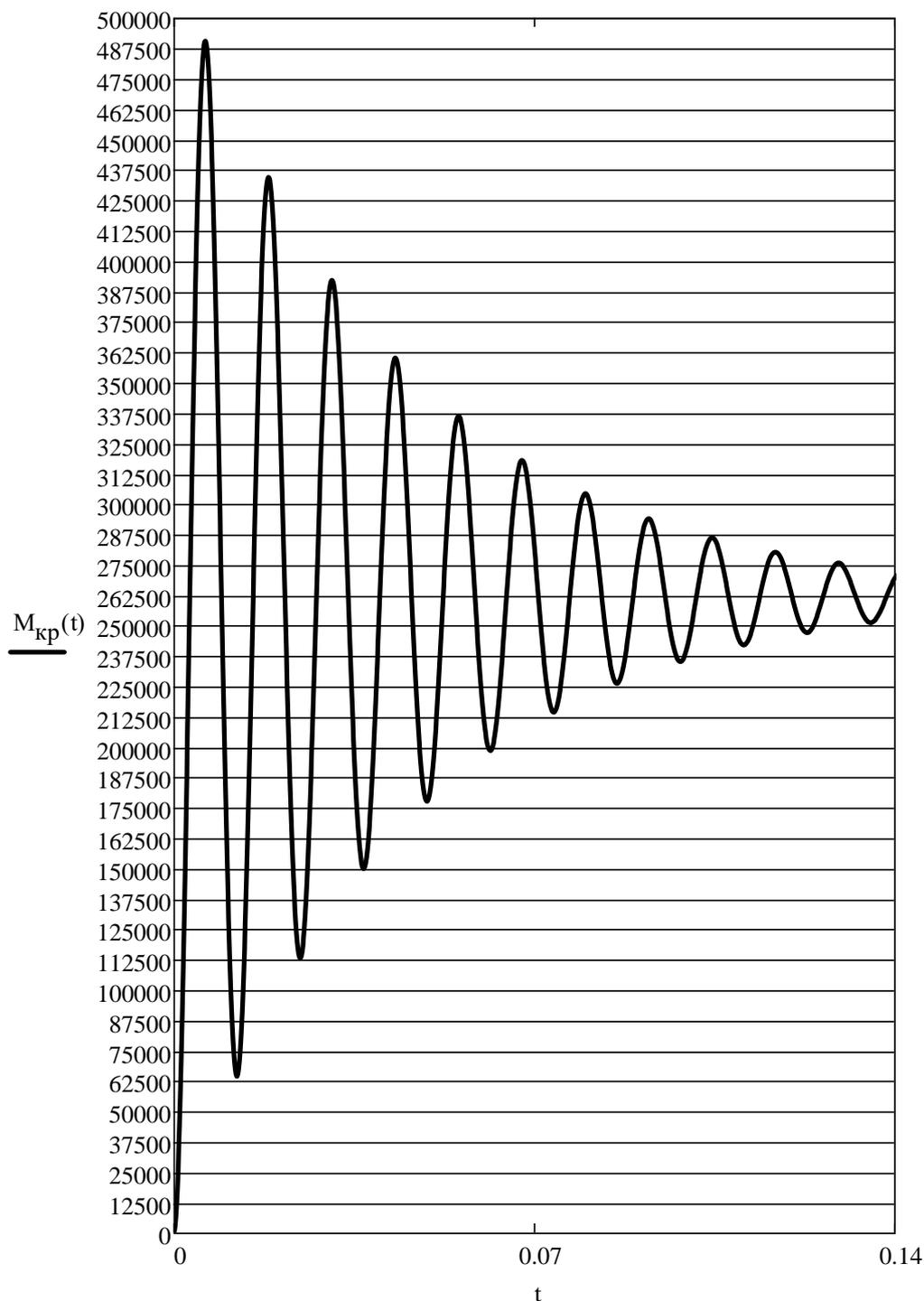


Рис. 4. Фрагмент осциллограммы с переходным процессом:
 $M_{кр}(t)$ – функция крутящего момента [Н·м]; t – время [с]

Метод цифровой обработки осциллограммы – регламентированный в ГОСТ 25.101–83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов» двухпараметрический метод размахов, частично реализованный в компьютерной среде MathCAD [2, 3].

Метод вычисления предела выносливости вала в его опасном сечении – регламентированная в ГОСТ 25.504–83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости» статистическая теория подобия усталостного разрушения.

Результаты и их обсуждение

На обрабатываемом фрагменте осциллограммы (участок с переходным процессом) найдено 11 максимумов и 11 минимумов – всего 22 экстремума (рис. 5).

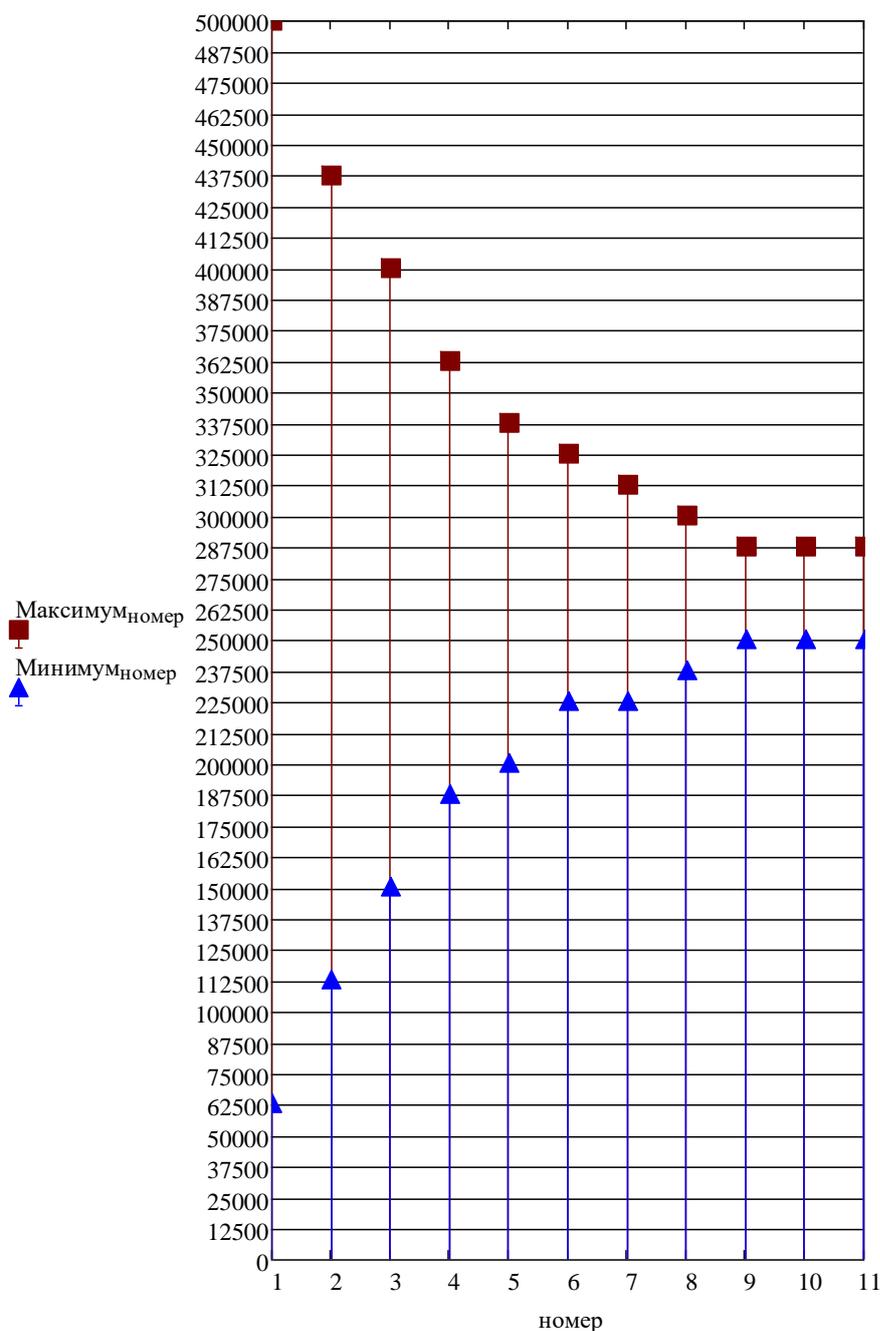


Рис. 5. Экстремумы на осциллограмме:

Максимум_{номер} – максимумы [Н·м];

Минимум_{номер} – минимумы [Н·м]

Вычислено среднеарифметическое значение экстремумов:

$$M_{\text{cp}} = \frac{\sum M_i}{n_3} = 272159, \quad (1)$$

где $n_3 = 22$ – число экстремумов.

Вычислен коэффициент нерегулярности процесса нагружения:

$$\chi = \frac{n_{\text{п}}}{n_3} = \frac{22}{22} = 1, \quad (2)$$

где $n_{\text{п}} = 22$ – число точек пересечения графика $M_{\text{кр}}(t)$ и уровня M_{cp} (рис. 6).

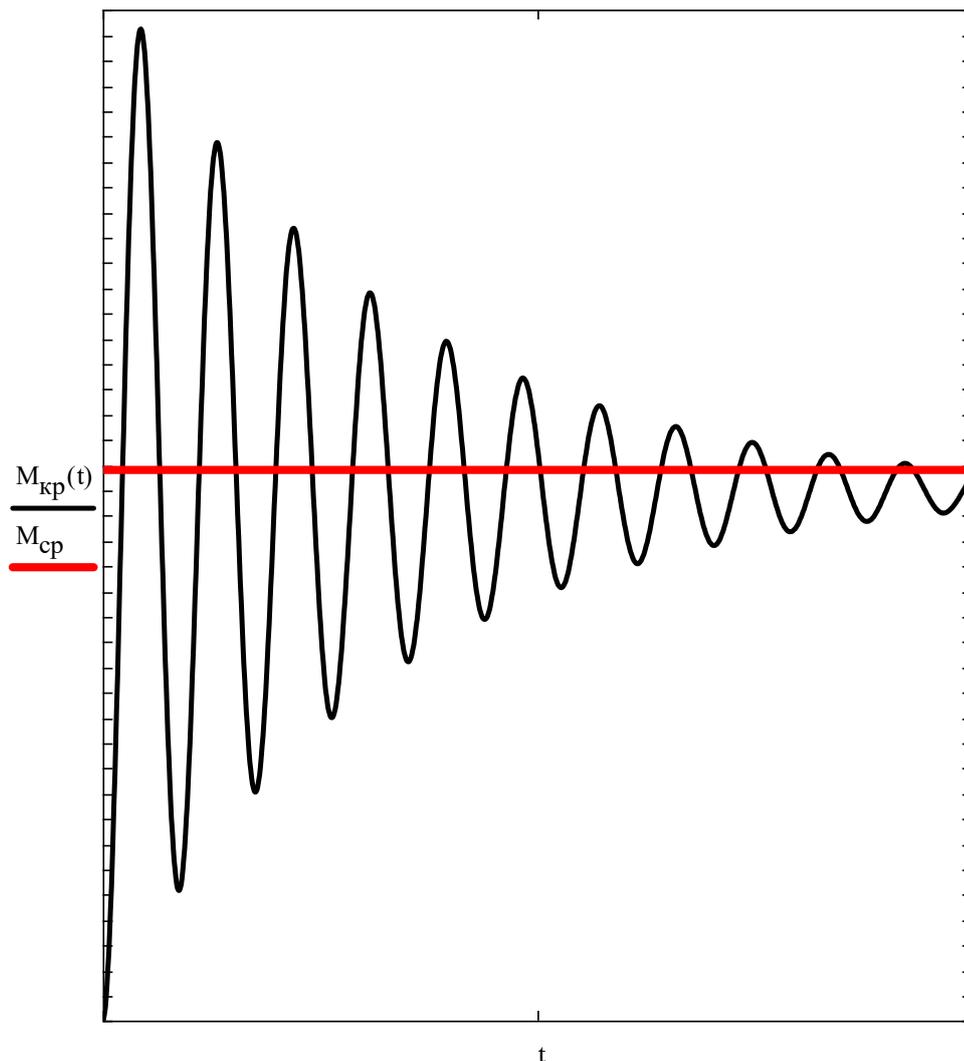


Рис. 6. К вычислению коэффициента нерегулярности процесса нагружения:
 $M_{\text{кр}}(t)$ – график функции крутящего момента [Н·м]; t – время [с];
 M_{cp} – уровень среднеарифметического значения экстремумов

Вычислены амплитудные и средние значения нисходящих размахов или циклов (рис. 7).

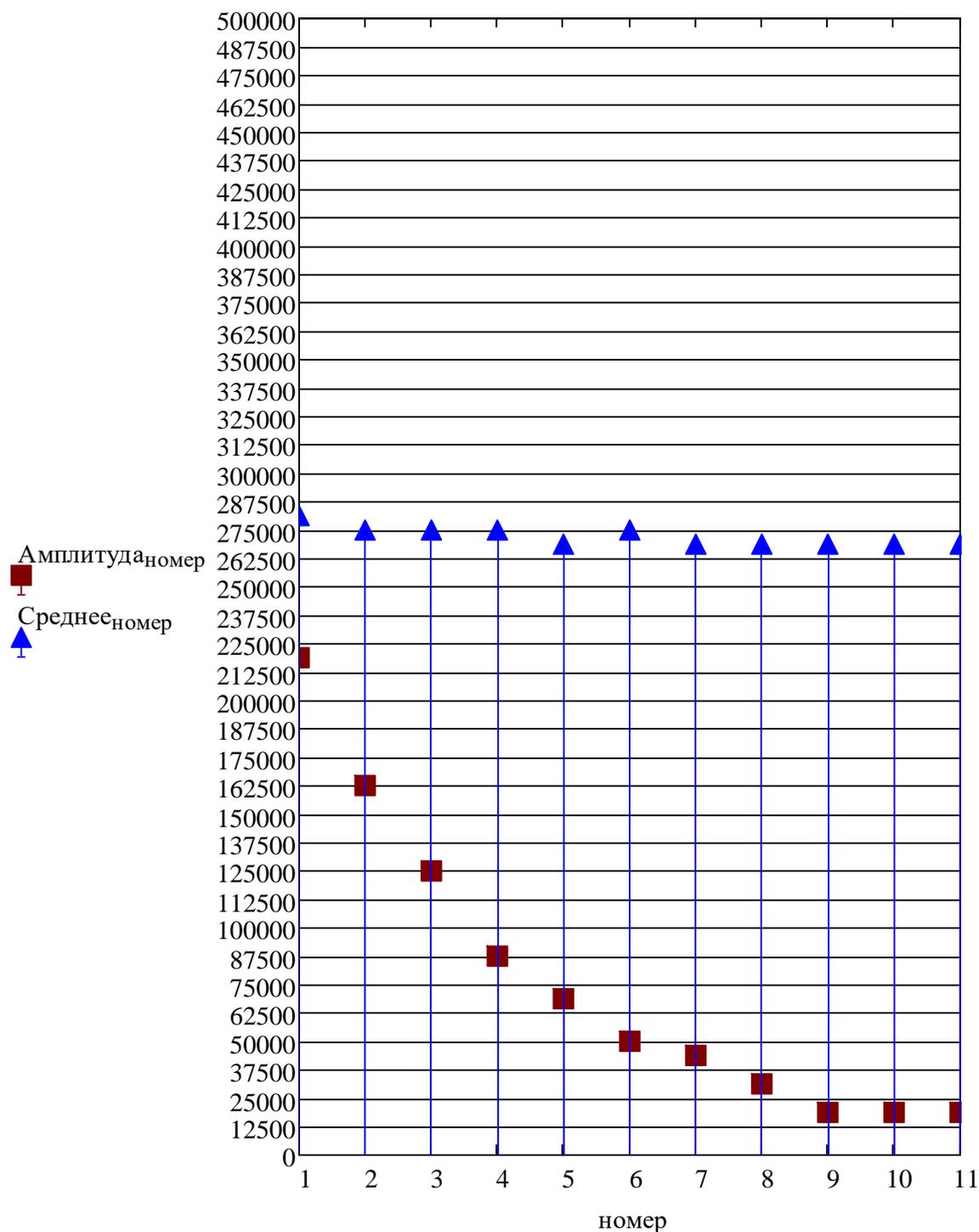


Рис. 7. Экстремумы на осциллограмме:
 Амплитуда_{номер} – амплитуды циклов [Н·м];
 Среднее_{номер} – средние значения циклов [Н·м]

Вычислен теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений в области опасного сечения вала при его кручении

$$a_{\tau} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{6,8\rho}{D-d} + 19,0 \frac{\left(1 + \frac{d}{2\rho}\right)^2}{\left(\frac{d}{2\rho}\right)^3} + \frac{4\rho}{(D-d)^2} \cdot \frac{d}{D}}} = 1,55, \quad (3)$$

Вычислен относительный градиент, характеризующий скорость убывания касательного напряжения по мере удаления от места концентрации:

$$\bar{G}_{\tau} = \frac{1,15}{\rho} + \frac{2}{d} = 0,13 \text{ мм}^{-1}. \quad (4)$$

Относительный критерий подобия усталостного разрушения

$$\theta = \frac{\pi d}{88,3 \bar{G}_{\tau}} = 50,78 \text{ мм}^2. \quad (5)$$

Коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений и масштабному фактору при изгибе или растяжении-сжатии

$$v_{\sigma} = \begin{cases} 0,211 - 0,000143 \sigma_{\text{в}}, & \text{при } \sigma_{\text{в}} \leq 1300 \text{ МПа}; \\ 0,025, & \text{при } \sigma_{\text{в}} > 1300 \text{ МПа}, \end{cases} \quad (6)$$

а при кручении

$$v_{\tau} = 1,5 v_{\sigma}. \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{в}} = 610 \text{ МПа}$ – предел прочности стали 45.

Коэффициент снижения предела выносливости

$$K = \frac{2a_{\tau}}{1 + \theta^{-v_{\tau}}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 = 2,17, \quad (8)$$

где $K_{F\tau} = 0,93$ – коэффициент качества механической обработки вала.

Предел выносливости опасного сечения вала при кручении

$$\tau_{-1\text{сеч}} = \frac{\tau_{-1}}{K} = \frac{178,97}{2,17} \approx 83 \text{ МПа}. \quad (9)$$

Коэффициент чувствительности металла в опасном сечении вала к асимметрии цикла нагрузки

$$\Psi = \frac{0,01 + 10^{-4} \cdot \sigma_{\text{в}}}{K} = 0,033. \quad (10)$$

Перерасчет крутящих моментов в касательные напряжения выполнен по формуле

$$\tau_{\text{кр}}(t) = \frac{M_{\text{кр}}(t)}{0,2 d^3}, \quad (11)$$

в результате чего получена осциллограмма напряжений (рис. 8).

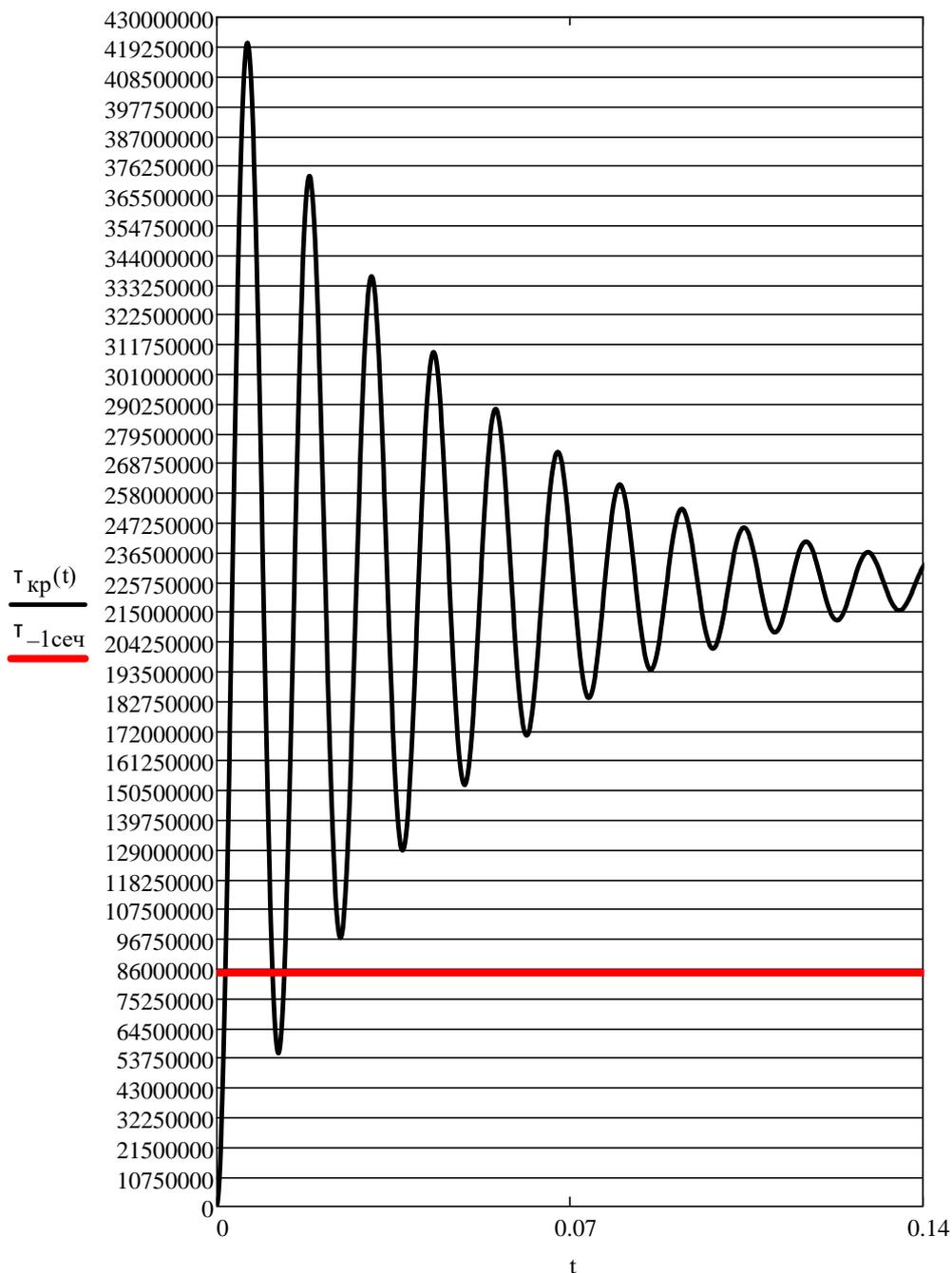


Рис. 8. Осциллограмма напряжений в опасном сечении вала:

$\tau_{кр}(t)$ – функция касательных напряжений [Па];

$\tau_{1сеч}$ – предел выносливости вала в опасном сечении [Па]

Вычислены амплитуды касательных напряжений (рис. 9), приведенные к симметричному циклу по формуле

$$\tau_{пр} = \tau_{амплитудное} + \Psi \cdot \tau_{среднее}, \quad (12)$$

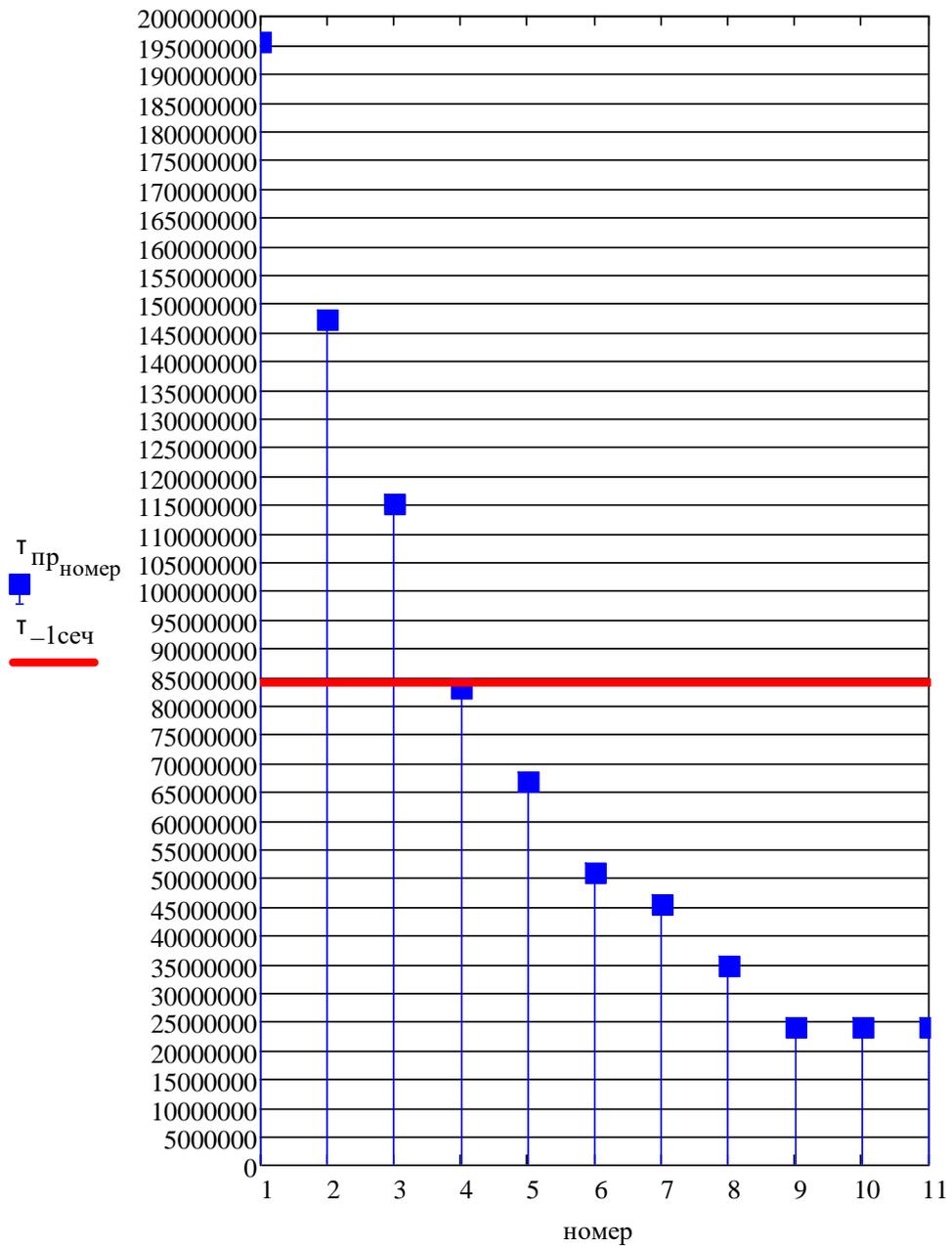


Рис. 9. Спектр касательных напряжений в опасном сечении вала:
 $\tau_{пр\ номер}$ – приведенные к симметричному циклу амплитуды спектра [Па];
 $\tau_{-1сеч}$ – предел выносливости вала в опасном сечении [Па]

Выводы

1. Циклическая прочность вала, под которой понимают его способность сопротивляться действию знакопеременного кручения без разрушения в опасном сечении, является важным критерием работоспособности.

2. Первым шагом в направлении оценки циклической прочности вала является обработка тензометрических данных с целью выявления спектра действующих в опасном сечении напряжений.

3. Для цифровой обработки имитационной осциллограммы выбран двухпараметрический метод размахов, поскольку выполняется следующее условие его применимости: $0,5 \leq \chi \leq 1$.

4. Построенный спектр касательных напряжений, возникающих при знакопеременном кручении в опасном сечении вала, содержит три приведенные к симметричному циклу амплитуды, превышающие предел выносливости вала в этом сечении.

5. Авторы планируют выполнить вероятностный расчет циклической прочности опасного сечения вала и спрогнозировать его ресурс, выраженный количеством прокатанных заготовок до момента появления макроскопической трещины в металле вала.

Список литературы

1. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах. – Мариуполь: Издательство ПГТУ, 2008. – 246с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23386214>
2. Мальцев А.А. Алгоритм цифровой обработки осциллограммы крутящего момента на валу электродвигателя автоматического стана. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2020, № 01. – С. 107 – 117. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-01-2020/a229877>
3. 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>

References

1. Artyukh V. G. Loads and overloads in metallurgical machines. - Mariupol: publishing house of PSTU, 2008. - 246с. - access Mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23386214> [in Russian].
2. Maltsev A. A. Algorithm for digital processing of the torque oscillogram on the shaft of the automatic mill motor. - [Electronic resource] Original research (ORIS), 2020, no. 01. - Pp. 107-117. – Mode of access: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-01-2020/a229877> [in Russian].
3. 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].