



УДК 621.31:621.771.06-88

**АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОСЦИЛЛОГРАММЫ  
КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ВАЛУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО СТАНА****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**

Предложен алгоритм цифровой обработки осциллограммы крутящего момента с последовательным выделением полных крутильно-колебательных циклов, регистрацией их амплитудных и средних значений. В качестве исходного материала использована записанная в текстовый файл «OSC.txt» осциллограмма крутящего момента на валу электродвигателя, вращающего рабочие валки автоматического стана. В результате успешной апробации алгоритма на осциллограмме построен в среде MathCAD ступенчатый блок циклического нагружения вала электродвигателя крутящим моментом. Полученный результат цифровой обработки осциллограммы (блок) будет полезен как для дальнейшего исследования электромеханических переходных процессов в электродвигателе, так и для оптимизации конструкции самого автоматического стана и его взаимосвязи со средствами механизации и автоматизации.

**Ключевые слова:** электродвигатель, осциллограмма, MathCAD, металлургия.**ALGORITHM FOR DIGITAL PROCESSING OF THE TORQUE  
OSCILLOGRAM ON THE SHAFT OF THE ELECTRIC MOTOR OF THE  
AUTOMATIC MILL****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**

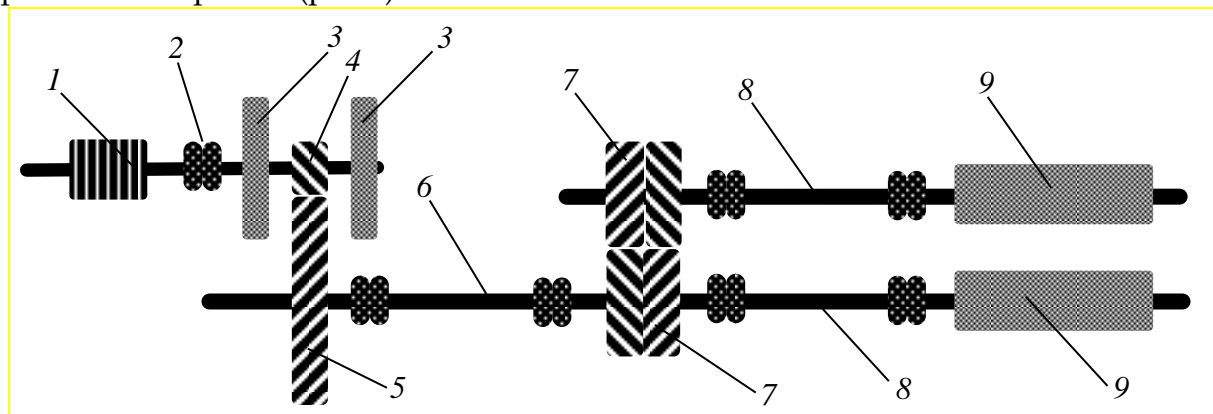
The algorithm of digital processing of the torque oscillogram with sequential selection of complete torsional-oscillatory cycles, registration of their amplitude and average values is proposed. As the source material used recorded in a text file "OSC.txt" oscillogram of torque on the shaft of an electric motor that rotates the working rolls of an automatic mill. As a result of successful testing of the algorithm on an oscillogram, a step-by-step block for cyclic loading of the motor shaft with torque was built in the MathCAD environment. The result of digital processing of the waveform data (block) will be useful for further studies of Electromechanical

transients in the motor, and to optimize the design of the automated mill and its relationship to mechanization and automation.

**Keywords:** electric motor, oscillogram, MathCAD, metallurgy.

### Введение

*Объект исследования* – главный электропривод автоматического стана трубопрокатного агрегата (рис.1).



4 – вал-шестерня; 5 – зубчатое колесо; 6 – трансмиссионный вал;  
7 – шестеренный валок; 8 – шпиндель; 9 – рабочий валок;

*Предмет исследования* – динамическая нестабильность в работе главного электропривода, вызванная ударным захватом прокатываемой заготовки рабочими валками, а также переходными процессами в электродвигателе.

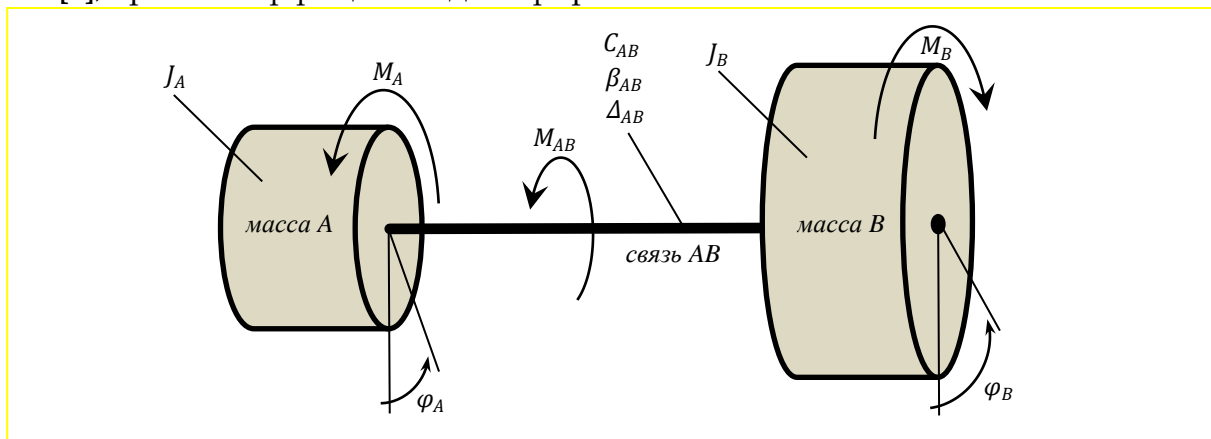
*Цель исследования* – построение ступенчатого блока циклического нагружения вала электродвигателя крутящим моментом по результатам цифровой обработки осциллограммы.

*Задачи исследования:*

- ✓ построение и идентификация параметров крутильно-колебательной модели главного электропривода автоматического стана;
- ✓ программирование крутильно-колебательной модели на ЭВМ в среде MathCAD и визуализация на мониторе имитационной осциллограммы;
- ✓ запись имитационной осциллограммы в текстовый файл «OSC.txt»;
- ✓ цифровая обработка осциллограммы методом выделения полных циклов по предложенному в статье алгоритму.

**Материалы и методы исследования**

Исходные данные – параметры (табл. 1) математической крутильно-колебательной модели главного электропривода автоматического стана ТПА 140 (рис. 2) – взяты из источника [1], кроме коэффициента демпфирования.



**Рисунок 2.** Структура крутильно-колебательной модели:

- $J_A$  и  $J_B$  – осевые моменты инерции масс A и B;
- $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  – угловые координаты масс A и B;
- $C_{AB}$  – крутильная жесткость упругой связи;
- $\beta_{AB}$  – коэффициент демпфирования;
- $\Delta_{AB}$  – люфт (угловой зазор);
- $M_{AB}$  – упругий крутящий момент;
- $M_A$  – момент электродвигателя;
- $M_B$  – момент прокатки

**Таблица 1**

Параметры крутильно-колебательной модели [1]

Обозначения	Численные значения	Единицы измерения
$J_A$	3540	кг · м <sup>2</sup>
$J_B$	5638	кг · м <sup>2</sup>
$C_{AB}$	$5,7 \cdot 10^8$	Н · м/рад
$\beta_{AB}$	$100 \cdot 10^3$	Н · м · с/рад
$\Delta_{AB}$	0,003	рад
$M_A$	320	кН · м
$M_B$	170	кН · м

Математическая модель – дифференциальные уравнения крутильно-колебательного движения [2], записанные на основании уравнений Лагранжа 2 рода для 2-массовой модели.

В общем случае дифференциальные уравнения Лагранжа 2 рода имеют следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \tag{1}$$

где  $t$  – время;  $T$  и  $U$  – кинетическая и потенциальная энергии механической системы;  $R$  – диссипативная функция Релея;  $q_i$  и  $\dot{q}_i$  – обобщенные координаты и скорости,  $Q_i$  – обобщенные внешние силы;  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – число степеней свободы модели.

Крутильно-колебательное движение 2-массовой модели описывается двумя уравнениями Лагранжа 2 рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_A} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_A} + \frac{\partial U}{\partial \varphi_A} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_A} = M_A;$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_B} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_B} + \frac{\partial U}{\partial \varphi_B} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_B} = -M_B.$$

или

$$M_{TA} + M_{UA} + M_{RA} = M_A;$$

$$M_{TB} + M_{UB} + M_{RB} = -M_B.$$

Кинетическая энергия крутильно-колебательной системы

$$T = \frac{J_A}{2} \left[ \frac{d\varphi_A(t)}{dt} \right]^2 + \frac{J_B}{2} \left[ \frac{d\varphi_B(t)}{dt} \right]^2.$$

Потенциальная энергия крутильно-колебательной системы

$$U = \frac{C_{AB}[\varphi_A(t) - \varphi_B(t)]^2}{2}.$$

Диссипативная функция Релея

$$R = \frac{\beta_{AB} \left[ \frac{d\varphi_A(t)}{dt} - \frac{d\varphi_B(t)}{dt} \right]^2}{2}.$$

Инерционные моменты

$$M_{TA} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_A} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_A} = J_A \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2};$$

$$M_{TB} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_B} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_B} = J_B \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2}.$$

Потенциальные моменты

$$M_{UA} = C_{AB}[\varphi_A(t) - \varphi_B(t)];$$

$$M_{UB} = -C_{AB}[\varphi_A(t) - \varphi_B(t)].$$

Диссипативные моменты

$$M_{RA} = \beta_{AB} \left[ \frac{d\varphi_A(t)}{dt} - \frac{d\varphi_B(t)}{dt} \right];$$

$$M_{RB} = -\beta_{AB} \left[ \frac{d\varphi_A(t)}{dt} - \frac{d\varphi_B(t)}{dt} \right].$$

Таким образом, на основании уравнений Лагранжа 2 рода (1) – (3) с учетом (4) – (9) построена математическая крутильно-колебательная модель электропривода:

$$J_A \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} + M_{AB}(t) = M_A;$$

$$J_B \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} - M_{AB}(t) = -M_B.$$

Упругий крутящий момент с учетом диссипации, вызванной фрикционным взаимодействием деталей электропривода, приобретают вид

$$M_{AB}(t) = C_{AB}[\varphi_A(t) - \varphi_B(t)] + \beta_{AB} \left[ \frac{d\varphi_A(t)}{dt} - \frac{d\varphi_B(t)}{dt} \right].$$

В момент времени непосредственный перед захватом заготовки рабочими валками отсутствуют крутильные колебания, поэтому начальные угловые координаты и начальные угловые скорости масс  $A$  и  $B$  равны нулю:

$$\varphi_A(0) = \varphi_B(0) = 0;$$

$$\frac{d\varphi_A(0)}{dt} = \frac{d\varphi_B(0)}{dt} = 0.$$

Для учета люфта  $\Delta_{AB}$  выполнен переход от угловых координат  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$ , к углу закручивания упругой связи  $\psi_{AB}$ :

(12)

$$\psi_{AB}(t) = \begin{cases} \varphi_A(t) - \varphi_B(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2}, & \text{при } \varphi_A(t) - \varphi_B(t) \geq \frac{\Delta_{AB}}{2}; \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{AB}}{2} < \varphi_A(t) - \varphi_B(t) < \frac{\Delta_{AB}}{2}; \\ \varphi_A(t) - \varphi_B(t) + \frac{\Delta_{AB}}{2}, & \text{при } \varphi_A(t) - \varphi_B(t) \leq -\frac{\Delta_{AB}}{2}; \end{cases}$$

Для учета времени нарастания момент электродвигателя ( $M_A = 320$  кН·м) и момент прокатки ( $M_B = 170$  кН·м) заданы как экспоненциальные функции времени:

$$M_A(t) = 320 \left[ 1 - e^{-\frac{t}{0,45 T_{\text{зах}}}} \right];$$

$$M_B(t) = 170 \left[ 1 - e^{-\frac{t}{0,45 T_{\text{зах}}}} \right],$$

где  $T_{\text{зах}} = 0,04$  с – продолжительность захвата заготовки рабочими валками. (14)

Компьютерная модель – формулы (10) – (14), запрограммированные в среде MathCAD в виде вычислительного блока следующим образом:

Given

$$\varphi_A(0) = 0 \quad \varphi_B(0) = 0$$

$$\varphi'_A(0) = 0 \quad \varphi'_B(0) = 0$$

$$\psi_{AB}(0) = 0 \quad M_{AB}(0) = 0$$

$$M_{AB}(t) = 5,7 \cdot 10^8 \cdot \psi_{AB}(t) \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot (\varphi'_A(t) - \varphi'_B(t))$$

$$\psi_{AB}(t) = \begin{cases} (\varphi_A(t) - \varphi_B(t)) - \frac{0,003}{2} & \text{if } (\varphi_A(t) - \varphi_B(t)) \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0 & \text{if } -\frac{\Delta_{AB}}{2} < (\varphi_A(t) - \varphi_B(t)) < \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ (\varphi_A(t) - \varphi_B(t)) + \frac{\Delta_{AB}}{2} & \text{if } (\varphi_A(t) - \varphi_B(t)) \leq -\frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases}$$

$$3540 \cdot \varphi''_A(t) + M_{AB}(t) = 320 \cdot 10^3 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{0,45 \cdot 0,04}\right) \right)$$

$$5638 \cdot \varphi''_B(t) - M_{AB}(t) = -170 \cdot 10^3 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{0,45 \cdot 0,04}\right) \right)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_A \\ \varphi_B \\ \psi_{AB} \\ M_{AB} \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[ \begin{pmatrix} \varphi_A \\ \varphi_B \\ \psi_{AB} \\ M_{AB} \end{pmatrix}, t, 0,3 \right]$$

$$\text{индекс} := 1..3000$$

$$M_{\text{индекс},1} := \frac{\text{индекс}}{10000}$$

$$M_{\text{индекс},2} := M_{AB} \left( \frac{\text{индекс}}{10000} \right)$$

$$\text{WRITEPRN}(\text{"OSC.txt"}) := M$$

Материал исследования – имитационная осциллограмма, записанная в текстовый файл «OSC.txt»:

0.0001 6.277

0.0002 15.3

0.0003 29.83

0.0004 52.03

0.0005 81.73

⋮ ⋮

0.2995 2.622e+005

0.2996 2.622e+005

0.2997 2.622e+005

0.2998 2.622e+005

0.2999 2.622e+005

0.3 2.622e+005

*Метод исследования* — метод «полных циклов», используемый для выделения и регистрации крутильно-колебательных циклов на осциллограмме нагружения детали согласно ГОСТ 25.101–83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов».

*Алгоритм метода исследования* — порядок действий для визуализации и дальнейшей цифровой обработки осциллограммы крутящего момента с последовательным выделением полных крутильно-колебательных циклов, регистрацией их амплитудных и средних значений [3].

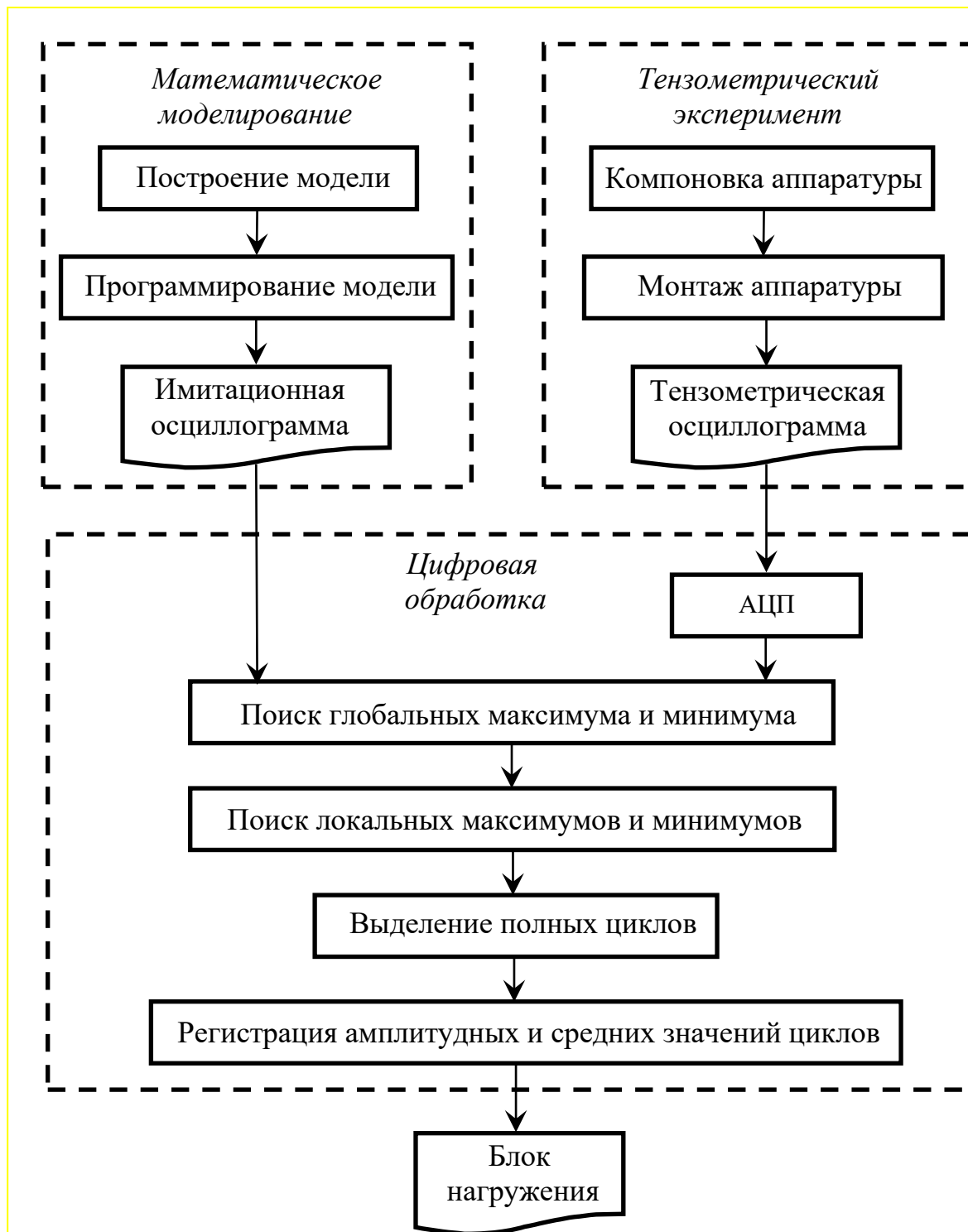


Рисунок 3. Блок-схема цифровой обработки осциллограммы:  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь

### Результаты и их обсуждение

Предварительный результат – визуализированная на экране монитора имитационная осциллограмма, прочитанная из текстового файла «OSC.txt», на которой отчетливо видны крутильные колебания (рис. 3).

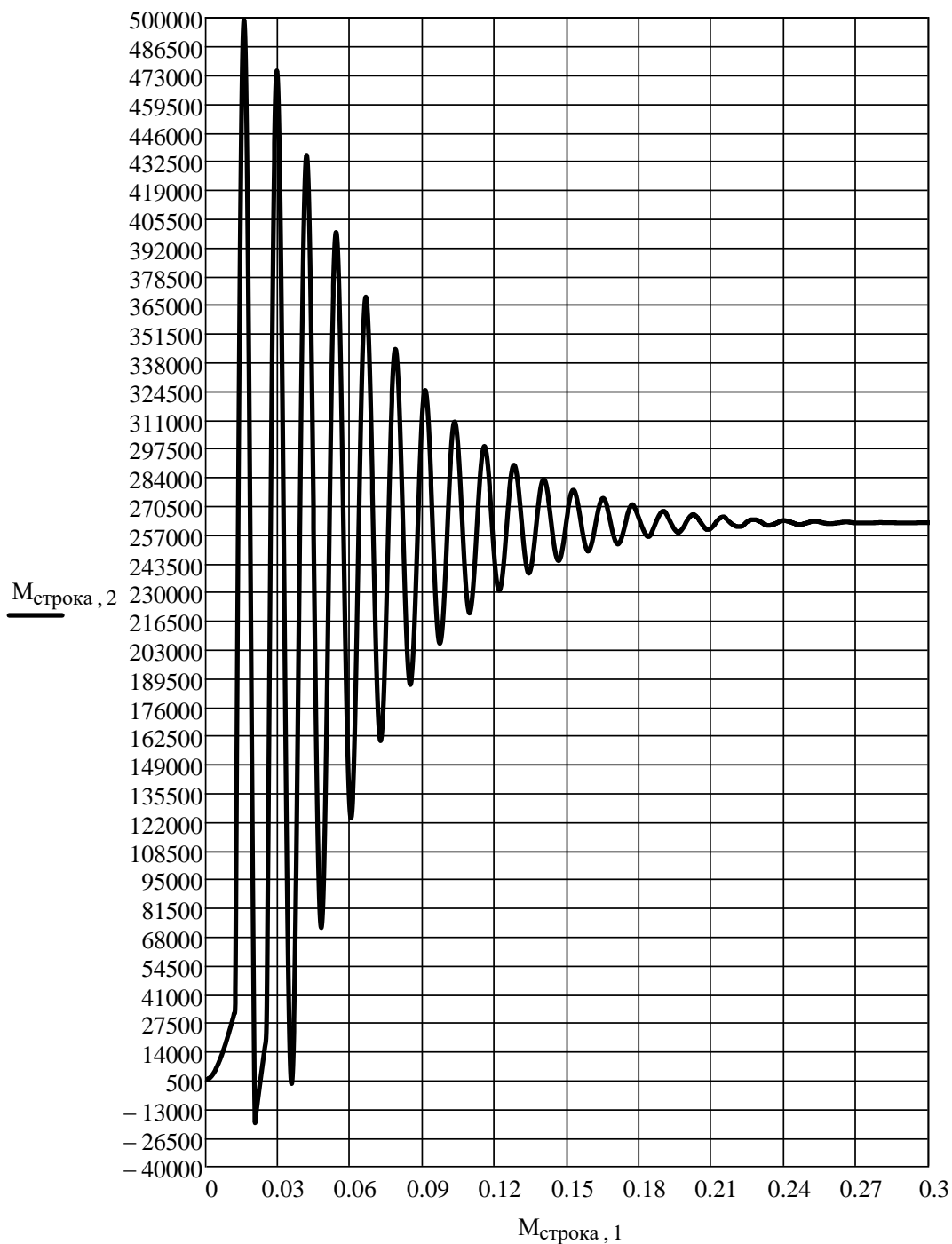


Рисунок 3. Имитационная осциллограмма крутильных колебаний:

$M_{\text{строка,1}}$  – время [с];

$M_{\text{строка,2}}$  – крутящий момент [Н·м]



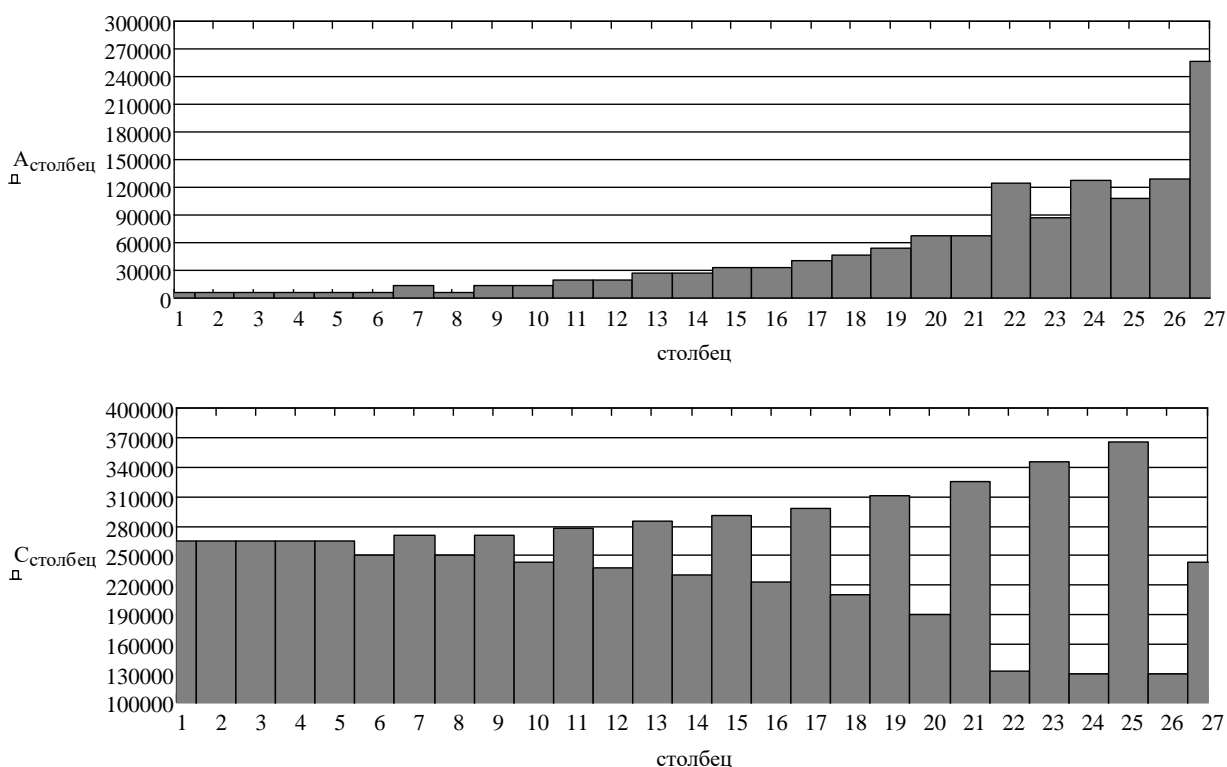
*Промежуточный результат* – зарегистрированные амплитудные и средние значения последовательно выделенных на осциллограмме полных крутильно-колебательных циклов (табл. 2).

Таблица 2

Параметры зарегистрированных циклов

Экстремумы		Размахи, [Н·м]	Амплитуды, [Н·м]	Средние значения, [Н·м]
Максимумы, [Н·м]	Минимумы, [Н·м]			
270500	257000	13500	6750	263750
270500	257000	13500	6750	263750
270500	257000	13500	6750	263750
270500	257000	13500	6750	263750
270500	257000	13500	6750	263750
257000	243500	13500	6750	250250
284000	257000	27000	13500	270500
257000	243500	13500	6750	250250
284000	257000	27000	13500	270500
257000	230000	27000	13500	243500
297500	257000	40500	20250	277250
257000	216500	40500	20250	236750
311000	257000	54000	27000	284000
257000	203000	54000	27000	230000
324500	257000	67500	33750	290750
257000	189500	67500	33750	223250
338000	257000	81000	40500	297500
257000	162500	94500	47250	209750
365000	257000	108000	54000	311000
257000	122000	135000	67500	189500
392000	257000	135000	67500	324500
257000	6800	250200	125100	131900
432500	257000	175500	87750	344750
257000	500	256500	128250	128750
473000	257000	216000	108000	365000
257000	0	257000	128500	128500
500000	-13000	513000	256500	243500

Окончательный результат — блок циклического нагружения вала электродвигателя крутящим моментом (рис. 4).



**Рисунок 4.** Блок нагружения в среде MathCAD:

$A_{\text{столбец}}$  — амплитудное значение цикла [Н·м];

$C_{\text{столбец}}$  — среднее значение цикла [Н·м];

### Выводы

1. Цифровая обработка осциллограммы крутящего момента на валу электродвигателя должна осуществляться с регистрацией амплитудных и средних значений всех крутильно-колебательных циклов.

2. Предложенный алгоритм цифровой обработки позволяет извлечь из осциллограммы всю необходимую для оптимизации конструкции самого автоматического стана и его взаимосвязи со средствами механизации и автоматизации информацию.

3. Построенный блок нагружения пригодится для прочностных расчетов деталей электропривода и дальнейших исследований электромеханических переходных процессов в электродвигателе.

### Список литературы

1. Рахманов С.Р. Особенности функционирования главной силовой линии автоматического стана трубопрокатного агрегата с учетом зазоров в сочленениях / *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2015, №6. С. 106 — 113. — Режим доступа: <https://scholar.google.ru/citations?user=qDLNqWEAAAIA&hl=ru>
2. Мальцев А.А. Исследование механических переходных процессов в электроприводе металлургической машины. — [Электронный ресурс] *Оригинальные исследования (ОРИС)*, 2019, №8. — С. 29 — 42. — Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-8-2019/>
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/>

### References

1. Rakhmanov S.R. Features of the functioning of the main power line of an automatic mill of a pipe rolling unit, taking into account gaps in the joints / Metallurgical and mining industry, 2015, No. 6. P. 106 - 113. - Access mode: <https://scholar.google.com/citations?user=qDLNqWEAAAAJ&hl=en> [in Russian].
2. Maltsev A.A. The study of mechanical transients in the electric drive of a metallurgical machine. - [Electronic resource] Original Research (ORIS), 2019, No. 8. - S. 29 - 42. - Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-8-2019/> [in Russian].
3. Maltsev A.A. The study of methods for processing oscillograms of torsional vibrations of the main electric drive of a metallurgical machine in a MathCAD environment. - [Electronic resource] Original Research (ORIS), 2019, No. 10. - S. 74 - 86. - Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-10-2019/> [in Russian].