



УДК 621.31:621.771.06-88

**РЕАЛИЗАЦИЯ В СРЕДЕ MATHCAD МЕТОДА «ДОЖДЯ» НА ПРИМЕРЕ  
ОСЦИЛЛОГРАММЫ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ 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](mailto:a.a.mal@bmstu.ru)**Аннотация**

Тензометрическая осциллограмма нагружения детали электропривода металлургической машины крутящим моментом, записанная в текстовый файл, нуждается в апостериорной математической обработке, которая предполагает регистрацию амплитуд и средних значений циклов крутильных колебаний. Для этого в среде MathCAD разработана программа со встроенной функцией считывания из текстового файла экспериментальных данных, реализующая с учетом ГОСТ 25.101-83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов» метод «дождя», приводящий к наиболее точному вычислительному результату.

Программа работает в полуавтоматическом режиме и уже успешно апробирована в рамках виртуальной лабораторной работы со студентами в компьютерном классе. В случае полной автоматизации вычислительного процесса, математическая обработка тензометрических результатов методом «дождя» значительно расширит возможности цифрового запоминающего осциллографа, подключенного к персональному компьютеру.

**Ключевые слова:** электропривод, осциллограмма, [MathCAD](#), металлургия, метод «дождя».**IMPLEMENTATION OF THE "RAIN" METHOD IN THE MATHCAD  
ENVIRONMENT ON THE EXAMPLE OF THE TORSIONAL OSCILLOGRAM  
OF THE ELECTRIC DRIVE OF A METALLURGICAL MACHINE****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 strain-gauge oscillogram of loading of a detail of the electric drive of the metallurgical machine by a torque, written down in the text file, needs a posteriori mathematical processing which assumes registration of amplitudes and average values of cycles of torsional oscillations. For this purpose in the Mathcad environment the program with the built-in function

of reading from the text file of experimental data realizing taking into account GOST 25.101-83 "Calculations and tests for durability is developed. Methods of schematization of random processes of loading of elements of machines and designs and statistical representation of results" the "rain" method leading to the most exact computational result.

The program works in semi-automatic mode and has already been successfully tested in the framework of virtual laboratory work with students in the computer classroom. In the case of full automation of the computational process, mathematical processing of tensometric results by the "rain" method will significantly expand the capabilities of a digital storage oscilloscope connected to a personal computer.

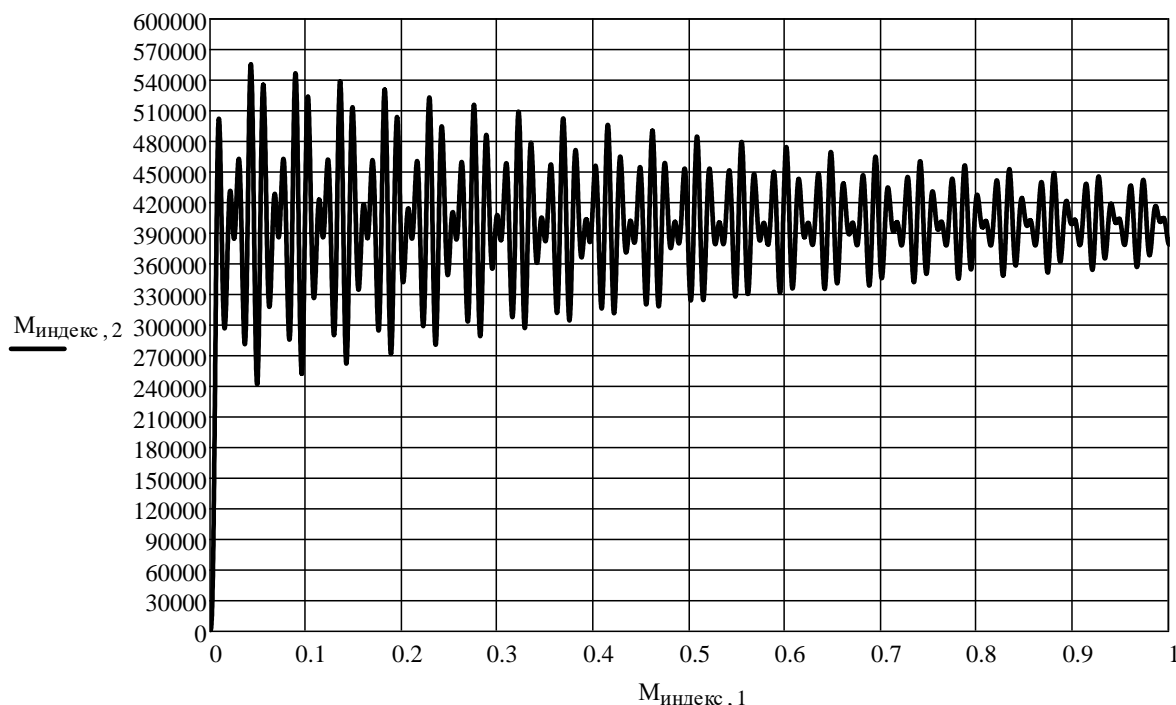
**Keywords:** electric drive, oscillogram, MathCAD, metallurgy, "rain" method

Апостериорная математическая обработка осциллограммы нагружения детали электропривода металлургической машины [1] крутящим моментом применяется для выявления амплитуд и средних значений циклов крутильных колебаний [2] и построения блока нагружения, необходимого для дальнейшего расчета опасного сечения детали на усталостную прочность.

Цель исследования состоит в выявлении и устранении недостатков апробации компьютерной программы, реализующей в среде MathCAD метод «дождя», на примере обработки тензометрической осциллограммы.

### Материалы и методы исследования

Материалом исследования является имитационная тензометрическая осциллограмма, записанная в текстовый файл Осц.txt в виде двумерного массива  $M$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Осциллограмма в MathCAD:  
 $M_{\text{индекс,2}}$  – крутящий момент  $M$  [Н·м];  
 $M_{\text{индекс,1}}$  – время  $t$  [с]

*Метод исследования* — метод «дождя», 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».

*Метод «дождя»* получил свое название из-за сходства с дождевыми ручьями, стекающими сверху вниз по многоярусной крыше (рис. 2).

Ручей из  $M_1$  стекает по трехъярусной крыше  $M_1—M_2—M_4—M_8$  (обозначена пунктиром), падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_{11}$ , поскольку максимум  $M_{11}$  больше максимума  $M_1$ . Регистрируется размах (полуцикл нагружения)  $M_1—M_8$ .

Ручей из  $M_2$  стекает по крыше  $M_2—M_3$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_4—M_5$ , поскольку минимум  $M_4$  меньше минимума  $M_2$ . Регистрируется размах  $M_2—M_3$ .

Ручей из  $M_3$  стекает по крыше  $M_3—M_4$  до прерывания в точке под  $M_2$ , поскольку максимум  $M_1$  больше максимума  $M_3$ . Регистрируется размах  $M_3—M_2$ .

Ручей из  $M_4$  стекает по крыше  $M_4—M_5$ , падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_8$ , поскольку минимум  $M_8$  меньше минимума  $M_4$ . Регистрируется размах  $M_4—M_5$ .

Ручей из  $M_5$  стекает по двурярусной крыше  $M_5—M_8$  до прерывания под точкой  $M_4$ , поскольку максимум  $M_1$  больше максимума  $M_5$ . Регистрируется размах  $M_5—M_4$ .

Ручей из  $M_6$  стекает по крыше  $M_6—M_7$ , падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_8$ , поскольку минимум  $M_8$  меньше минимума  $M_6$ . Регистрируется размах  $M_6—M_7$ .

Ручей из  $M_7$  стекает по крыше  $M_7—M_8$  до прерывания в точке под  $M_6$ , поскольку максимум  $M_5$  больше максимума  $M_7$ . Регистрируется размах  $M_7—M_6$ .

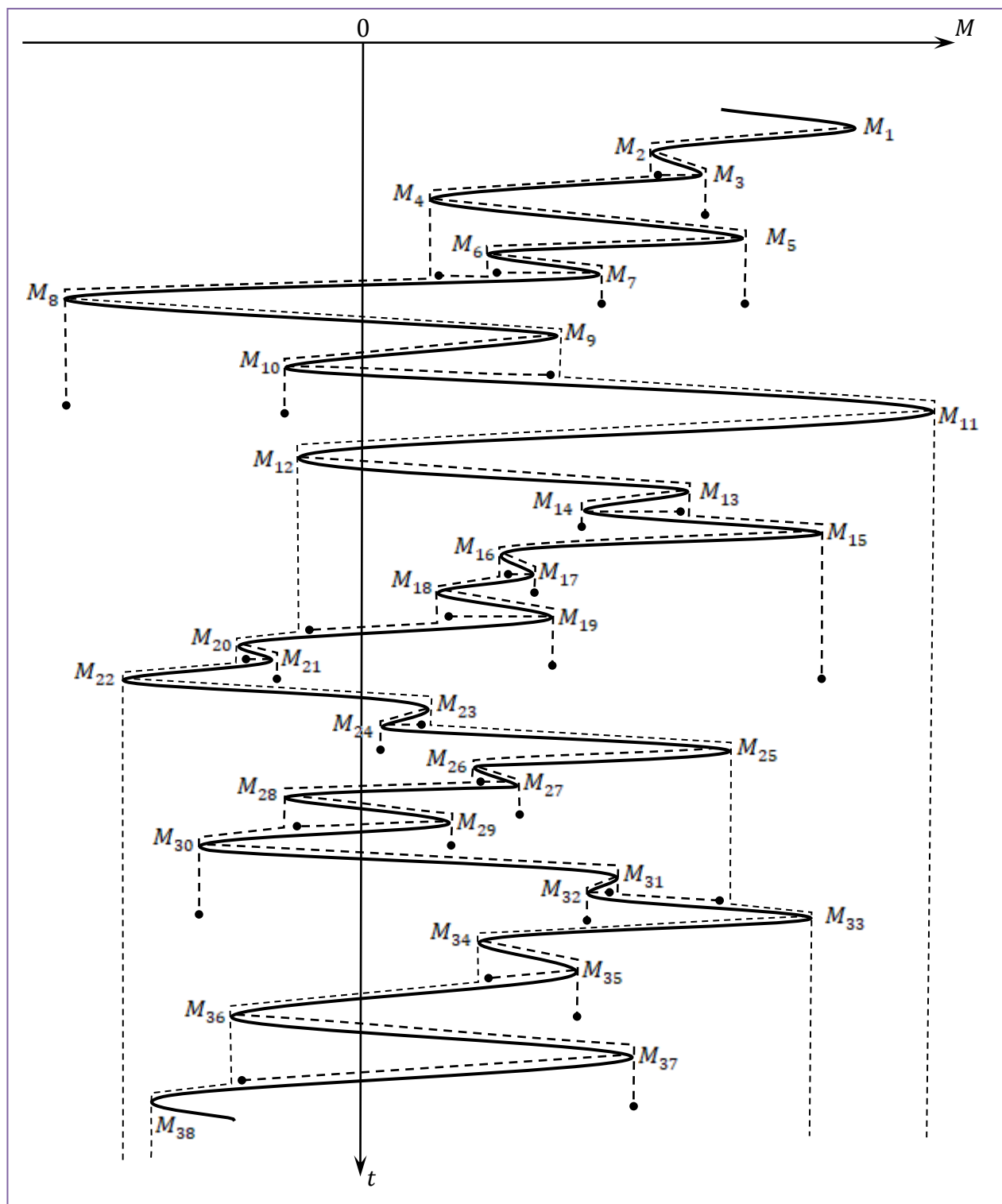


Рис. 2. Реализация алгоритма метода «дождя»:

$M$  – ось крутящих моментов [Н·м];

$M_1, M_3, \dots, M_{37}$  – максимумы [Н·м];

$M_2, M_4, \dots, M_{38}$  – минимумы [Н·м];

$t$  – ось времени [с]

Ручей из  $M_8$  стекает по двурусной крыше  $M_8—M_9—M_{11}$  и падает с нее на землю. Регистрируется размах  $M_8—M_{11}$ .

Ручей из  $M_9$  стекает по крыше  $M_9—M_{10}$ , падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_{11}$ , поскольку максимум  $M_{11}$  больше максимума  $M_9$ . Регистрируется размах  $M_9—M_{10}$ .

Ручей из  $M_{10}$  стекает по крыше  $M_{10}—M_{11}$  до прерывания в точке под  $M_9$ , поскольку минимум  $M_8$  меньше минимума  $M_{10}$ . Регистрируется размах  $M_{10}—M_9$ .

Ручей из  $M_{11}$  стекает по трёхъярусной крыше  $M_{11}—M_{12}—M_{20}—M_{22}$  и падает с нее на землю. Регистрируется размах  $M_{11}—M_{22}$ .

Ручей из  $M_{12}$  стекает по двухъярусной крыше  $M_{12}—M_{13}—M_{15}$ , падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_{22}$ , поскольку минимум  $M_{22}$  меньше минимума  $M_{12}$ . Регистрируется размах  $M_{12}—M_{15}$ .

Ручей из  $M_{13}$  стекает по крыше  $M_{13}—M_{14}$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_{15}—M_{16}$ , поскольку максимум  $M_{15}$  больше максимума  $M_{13}$ . Регистрируется размах  $M_{13}—M_{14}$ .

Ручей из  $M_{14}$  стекает по крыше  $M_{14}—M_{15}$  до прерывания в точке под  $M_{13}$ , поскольку минимум  $M_{12}$  меньше минимума  $M_{14}$ . Регистрируется размах  $M_{14}—M_{13}$ .

Ручей из  $M_{15}$  стекает по трёхъярусной крыше  $M_{15}—M_{16}—M_{18}—M_{20}$  до прерывания в точке под минимумом  $M_{12}$ , поскольку максимум  $M_{11}$  больше минимума  $M_{15}$ . Регистрируется размах  $M_{15}—M_{12}$ .

Ручей из  $M_{16}$  стекает по крыше  $M_{16}—M_{17}$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_{18}—M_{19}$ , поскольку минимум  $M_{18}$  меньше минимума  $M_{16}$ . Регистрируется размах  $M_{17}—M_{16}$ .

Ручей из  $M_{17}$  стекает по крыше  $M_{17}—M_{18}$  до прерывания в точке под  $M_{16}$ , поскольку максимум  $M_{15}$  больше максимума  $M_{17}$ . Регистрируется размах  $M_{17}—M_{16}$ .

Ручей из  $M_{18}$  стекает по крыше  $M_{18}—M_{19}$ , падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_{22}$ , поскольку минимум  $M_{22}$  меньше минимума  $M_{18}$ . Регистрируется размах  $M_{18}—M_{19}$ .

Ручей из  $M_{19}$  стекает по крыше  $M_{19}—M_{20}$  до прерывания в точке под  $M_{18}$ , поскольку максимум  $M_{15}$  больше максимума  $M_{19}$ . Регистрируется размах  $M_{19}—M_{18}$ .

Ручей из  $M_{20}$  стекает по крыше  $M_{20}—M_{21}$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_{22}—M_{23}$ , поскольку минимум  $M_{22}$  меньше минимума  $M_{20}$ . Регистрируется размах  $M_{20}—M_{21}$ .

Ручей из  $M_{21}$  стекает по крыше  $M_{21}—M_{22}$  до прерывания в точке под  $M_{20}$ , поскольку максимум  $M_{11}$  больше максимума  $M_{21}$ . Регистрируется размах  $M_{21}—M_{20}$ .

Ручей из  $M_{22}$  стекает по трёхъярусной крыше  $M_{22}—M_{23}—M_{25}—M_{33}$  и падает с нее на землю. Регистрируется размах  $M_{22}—M_{33}$ .

Ручей из  $M_{23}$  стекает по крыше  $M_{23}—M_{24}$  и падает с нее, прерываясь в точке напротив  $M_{25}$ , поскольку максимум  $M_{25}$  больше максимума  $M_{23}$ . Регистрируется размах  $M_{23}—M_{24}$ .

Ручей из  $M_{24}$  стекает по крыше  $M_{24}—M_{25}$  до прерывания в точке под  $M_{23}$ , поскольку минимум  $M_{22}$  меньше минимума  $M_{24}$ . Регистрируется размах  $M_{24}—M_{23}$ .

Ручей из  $M_{25}$  стекает по трёхъярусной крыше  $M_{25}—M_{26}—M_{28}—M_{30}$  и падает с нее, прерываясь в точке напротив  $M_{33}$ , поскольку максимум  $M_{33}$  больше максимума  $M_{25}$ . Регистрируется размах  $M_{25}—M_{30}$ .

Ручей из  $M_{26}$  стекает по крыше  $M_{26}—M_{27}$  и падает с нее, прерываясь в точке напротив  $M_{28}$ , поскольку минимум  $M_{28}$  меньше минимума  $M_{26}$ . Регистрируется размах  $M_{26}—M_{27}$ .

Ручей из  $M_{27}$  стекает по крыше  $M_{27}—M_{28}$  до прерывания в точке под  $M_{26}$ , поскольку максимум  $M_{25}$  больше максимума  $M_{27}$ . Регистрируется размах  $M_{27}—M_{26}$ .

Ручей из  $M_{28}$  стекает по крыше  $M_{28}—M_{29}$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_{30}—M_{31}$ , поскольку минимум  $M_{30}$  меньше минимума  $M_{28}$ . Регистрируется размах  $M_{28}—M_{29}$ .

Ручей из  $M_{29}$  стекает по крыше  $M_{29}—M_{30}$  до прерывания в точке под  $M_{28}$ , поскольку максимум  $M_{25}$  больше максимума  $M_{29}$ . Регистрируется размах  $M_{29}—M_{28}$ .

Ручей из  $M_{30}$  стекает по двухъярусной крыше  $M_{30}—M_{31}—M_{33}$  до прерывания в точке под  $M_{25}$ , поскольку минимум  $M_{22}$  меньше минимума  $M_{30}$ . Регистрируется размах  $M_{30}—M_{25}$ .

Ручей из  $M_{31}$  стекает по крыше  $M_{31}—M_{32}$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_{33}—M_{34}$ , поскольку максимум  $M_{33}$  больше максимума  $M_{31}$ . Регистрируется размах  $M_{31}—M_{32}$ .

Ручей из  $M_{32}$  стекает по крыше  $M_{32}—M_{33}$  до прерывания в точке под  $M_{31}$ , поскольку минимум  $M_{30}$  меньше минимума  $M_{32}$ . Регистрируется размах  $M_{32}—M_{31}$ .

Ручей из  $M_{33}$  стекает по трехъярусной крыше  $M_{33}—M_{34}—M_{36}—M_{38}$  и падает с нее на землю. Регистрируется размах  $M_{33}—M_{38}$ .

Ручей из  $M_{34}$  стекает по крыше  $M_{34}—M_{35}$ , падает с нее и прерывается в точке перед  $M_{36}—M_{37}$ , поскольку минимум  $M_{36}$  меньше минимума  $M_{34}$ . Регистрируется размах  $M_{34}—M_{35}$ .

Ручей из  $M_{35}$  стекает по крыше  $M_{35}—M_{36}$  до прерывания в точке под  $M_{34}$ , поскольку максимум  $M_{33}$  больше максимума  $M_{35}$ . Регистрируется размах  $M_{35}—M_{34}$ .

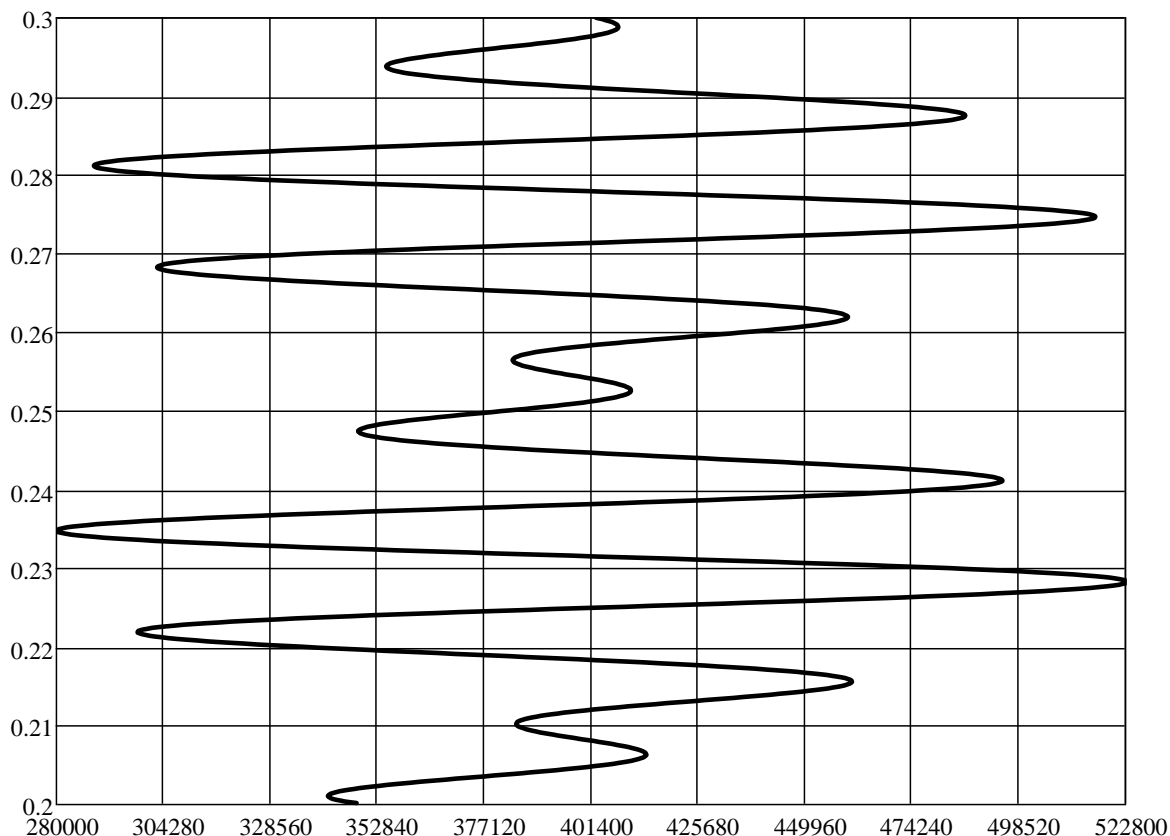
Ручей из  $M_{36}$  стекает по крыше  $M_{36}—M_{37}$ , падает с нее и прерывается в точке напротив  $M_{38}$ , поскольку минимум  $M_{38}$  меньше минимума  $M_{36}$ . Регистрируется размах  $M_{36}—M_{37}$ .

Ручей из  $M_{37}$  стекает по крыше  $M_{37}—M_{38}$  до прерывания в точке под  $M_{36}$ , поскольку максимум  $M_{33}$  больше максимума  $M_{37}$ . Регистрируется размах  $M_{37}—M_{36}$ .

### Результаты и их обсуждение

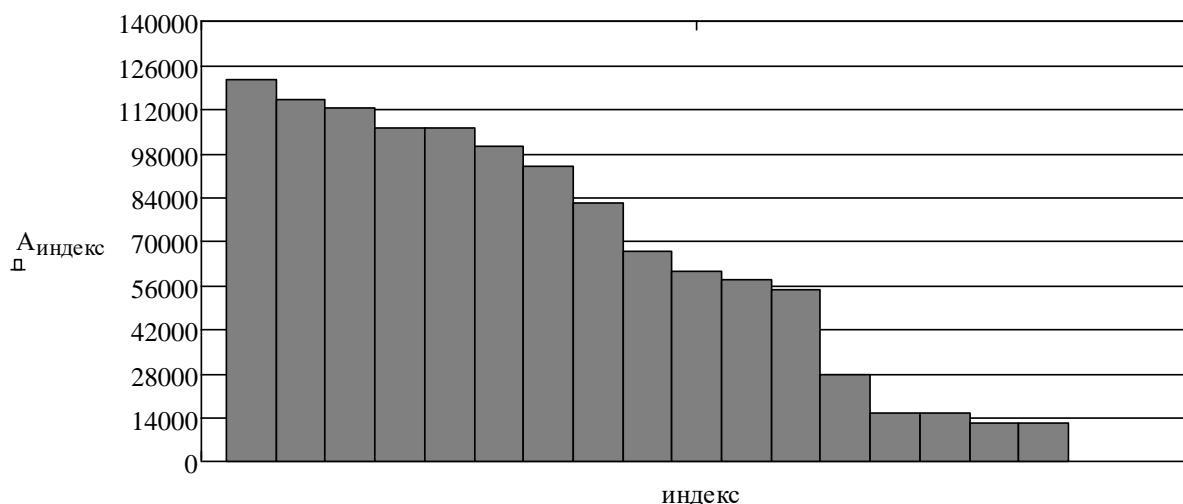
Таким образом, для апостериорной полуавтоматической компьютерной обработки имитационной тензометрической осциллограммы крутильных колебаний на всех временных интервалах (рис. 3) был успешно апробирован алгоритм, реализующий метод «дождя» согласно следующим правилам:

1. Ручьи начинаются поочередно из каждого экстремума.
2. Ручей из точки максимума прерывается при встрече с еще большим максимумом, а ручей из точки минимума прерывается при встрече с еще меньшим минимумом.
3. При встрече на одной из крыш нескольких ручьев движение продолжает ручей, вытекающий из экстремума с меньшим номером, а остальные ручьи прерываются.
4. Ручей, не встретивший препятствий, падает на землю.



**Рис. 3.** Фрагмент осциллограммы в MathCAD:  
 $t \in [0.2, 0.3]$  – временной интервал [с];  
 $M \in [280000, 522800]$  – диапазон изменения крутящего момента [Н·м];

Построен блок нагружения детали электропривода металлургической машины крутящим моментом (рис. 4).



**Рис. 4.** Блок нагружения в MathCAD:  
 $A_{индекс}$  – амплитуда полуцикла (размаха) [Н·м];

**Выводы**

1. В результате апостериорной обработки осциллограммы методом «дождя» были учтены все наложенные крутильно-колебательные циклы, что исключает ошибку в регистрации циклов нагружения.

2. Реализация громоздкого алгоритма метода «дождя» в среде MathCAD требует достаточно высокого уровня программирования, поэтому, по мнению автора, в случае с металлургической машиной, метод «дождя» целесообразно заменить на метод полных циклов, дающий согласно ГОСТ 25.101–83 не менее точные результаты.

3. После доработки алгоритма, метод «дождя» позволит математически обрабатывать осциллограмму в режиме реального времени [3].

### Список литературы

1. 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. – 158с.
2. Мальцев А.А. Исследование механических переходных процессов в электроприводе металлургической машины. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2019. Том 9. № 8. – С. 29 – 42. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-8-2019/a229791> (дата обращения: 11.11.2019).
3. Мальцев А.А., Восканьянц А.А., Шинкарев А.С. Универсальный измерительный комплекс стана ДУО-160. – [Электронный ресурс] Научный альманах. №7(9). 2015. – С. 713 – 720. – Режим доступа: <http://ucom.ru/doc/na.2015.07.713.pdf> (дата обращения: 11.11.2019).

### References

1. Kolesnikov A.G., Yakovlev R.A., Maltsev A. A. Technological equipment of rolling production / A.G. Kolesnikov. M.: Publisher BMSTU. 2014. - 158p.
2. Maltsev A. A. Investigation of mechanical transients in electric drive of metallurgical machine. - [Electronic resource] Original research (ORES). 2019. Vol.9.No.8. - P. 29 - 42. – Mode of access: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-8-2019/a229791> (date accessed: 11.11.2019).
3. Maltsev A. A., Voskanyants A. A., Shinkarev A. S. Universal measuring complex of DUO-160 mill. – [Electronic resource]: Scientific almanac. 2015. No. 7(9). - P. 713 - 720. – Mode of access: <http://ucom.ru/doc/na.2015.07.713.pdf> (date accessed: 11.11.2019).