

УДК 621.3

**НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ВЫХОДНОГО ВАЛА
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРОКАТНОГО СТАНА****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Построен спектр нагружения выходного вала электродвигателя пятой клетки непрерывного широкополосного стана (НШС) 2000 Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) крутящим моментом при прокатке полосы 1,2×1250 из стали 3КП.

Ключевые слова: электропривод, крутильные колебания, прокатный стан.

**SCIENTIFIC RESEARCH OF THE LOADING OF THE OUTPUT SHAFT OF A
ROLLING MILL ELECTRIC MOTOR****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

The spectrum of loading the output shaft of the fifth stand of the continuous broad-band mill (НШС) 2000 of the Novolipetsk Metallurgical Plant (НЛМК) with torque during rolling of a 1.2×1250 strip made of 3КП steel has been constructed.

Keywords: electric drive, torsional vibrations, rolling mill.

Объект исследования – привод пятой (черновой) клетки НШС 2000 НЛМК, который включает в себя электродвигатель, муфту моторную, одноступенчатый цилиндрический редуктор, муфту коренную, шестеренную клеть, верхний и нижний шпиндели.

Поставлена задача проанализировать нагружение выходного вала электродвигателя этой клетки при прокатке полосы 1,2×1250 из стали 3КП.

Теоретический путь решения задачи – компьютерное моделирование возникающих в приводе крутильных колебаний с целью построения и дальнейшей обработки графика нагружения выходного вала. Для этого построена механическая модель привода: сформированы и представлены в виде абсолютно жестких дисков сосредоточенные массы А, В, С, D, E (рис. 1).

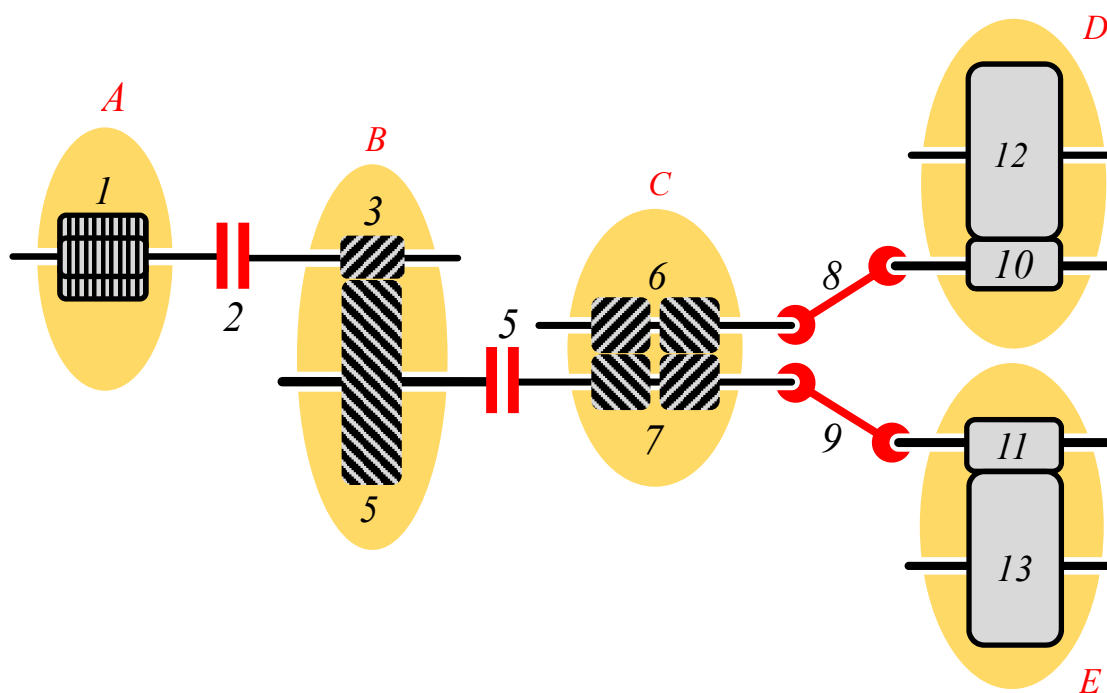


Рисунок 1. Механическая модель привода:

- 1 – ротор электродвигателя;
- 2 – моторная муфта;
- 3 – вал-шестерня редуктора;
- 4 – зубчатое колесо редуктора;
- 5 – коренная муфта;
- 6 – верхний шестеренный валок;
- 7 – нижний шестеренный валок;
- 8 – верхний шпиндель;
- 9 – нижний шпиндель;
- 10 – верхний рабочий валок пятой клетки;
- 11 – нижний рабочий валок пятой клетки;
- 12 – верхний опорный валок пятой клетки;
- 13 – нижний опорный валок пятой клетки

Разветвленная структура механической (расчетной) модели открывает возможность учитывать асимметрию нагружения привода, когда $M_D \neq M_E$ (рис. 2).

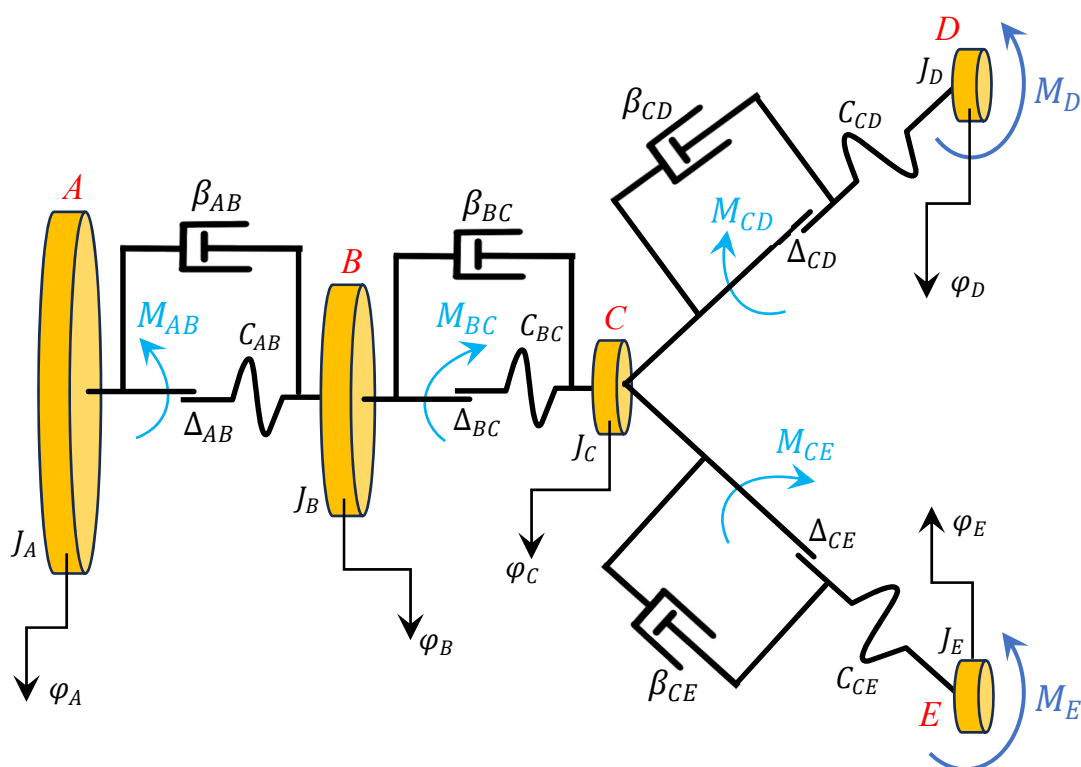


Рисунок 2. Расчетная модель привода:
 диск А – ротор электродвигателя;
 диск В – зубчатая передача редуктора;
 диск С – валки шестеренной клетки;
 диск D – верхние валки (рабочий и опорный);
 диск E – нижние валки (рабочий и опорный);
 связь АВ – моторная соединительная муфта;
 связь ВС – коренная соединительная муфта;
 связь CD – верхний универсальный шпиндель;
 связь CE – нижний универсальный шпиндель

Параметры расчетной модели привода (табл. 1) идентифицированы по данным, взятым из учебного пособия Р.А. Яковлева [1].

Таблица 1. Параметры расчетной модели привода

Параметр	Обозначение	Величина	Размерность
Момент инерции диска А	J_A	$1\,450 \times 10^3$	кг · м ²
Момент инерции диска В	J_B	205×10^3	кг · м ²
Момент инерции диска С	J_C	22×10^3	кг · м ²
Момент инерции диска D	J_D	$17,5 \times 10^3$	кг · м ²
Момент инерции диска E	J_E	$17,5 \times 10^3$	кг · м ²
Жесткость связи АВ	C_{AB}	$2\,350 \times 10^6$	Н · м/рад
Жесткость связи ВС	C_{BC}	$1\,430 \times 10^6$	Н · м/рад
Жесткость связи CD	C_{CD}	125×10^6	Н · м/рад
Жесткость связи CE	C_{CE}	125×10^6	Н · м/рад

Люфт в связи АВ	Δ_{AB}	0,003	рад
Люфт в связи ВС	Δ_{BC}	0,002	рад
Люфт в связи CD	Δ_{CD}	0,015	рад
Люфт в связи CE	Δ_{CE}	0,015	рад
Демпфирование в связи АВ	β_{AB}	1×10^6	Н·м·с/рад
Демпфирование в связи ВС	β_{BC}	1×10^6	Н·м·с/рад
Демпфирование в связи CD	β_{CD}	1×10^6	Н·м·с/рад
Демпфирование в связи CE	β_{CE}	1×10^6	Н·м·с/рад
Внешний момент (диск D)	M_D	900×10^3	Н·м
Внешний момент (диск E)	M_E	900×10^3	Н·м
Угловая координата диска А	φ_A	$\varphi_A(t)$	рад
Угловая координата диска В	φ_B	$\varphi_B(t)$	рад
Угловая координата диска С	φ_C	$\varphi_C(t)$	рад
Угловая координата диска D	φ_D	$\varphi_D(t)$	рад
Угловая координата диска E	φ_E	$\varphi_E(t)$	рад

Примечание: t – переменная времени [с].

Угловые скорости дисков [рад/с]:

$$\omega_A(t) = d\varphi_A(t)/dt$$

$$\omega_B(t) = d\varphi_B(t)/dt$$

$$\omega_C(t) = d\varphi_C(t)/dt$$

$$\omega_D(t) = d\varphi_D(t)/dt$$

$$\omega_E(t) = d\varphi_E(t)/dt$$

Угловые ускорения дисков [рад/с²]:

$$\varepsilon_A(t) = d\omega_A(t)/dt$$

$$\varepsilon_B(t) = d\omega_B(t)/dt$$

$$\varepsilon_C(t) = d\omega_C(t)/dt$$

$$\varepsilon_D(t) = d\omega_D(t)/dt$$

$$\varepsilon_E(t) = d\omega_E(t)/dt$$

Параметры закручивания связей [рад]:

$$\varphi_{AB}(t) = \varphi_A(t) - \varphi_B(t)$$

$$\varphi_{BC}(t) = \varphi_B(t) - \varphi_C(t)$$

$$\varphi_{CD}(t) = \varphi_C(t) - \varphi_D(t)$$

$$\varphi_{CE}(t) = \varphi_C(t) - \varphi_E(t)$$

$$\omega_{AB}(t) = \omega_A(t) - \omega_B(t)$$

$$\omega_{BC}(t) = \omega_B(t) - \omega_C(t)$$

$$\omega_{CD}(t) = \omega_C(t) - \omega_D(t)$$

$$\omega_{CE}(t) = \omega_C(t) - \omega_E(t)$$

$$\varepsilon_{AB}(t) = \varepsilon_A(t) - \varepsilon_B(t)$$

$$\varepsilon_{BC}(t) = \varepsilon_B(t) - \varepsilon_C(t)$$

$$\varepsilon_{CD}(t) = \varepsilon_C(t) - \varepsilon_D(t)$$

$$\varepsilon_{CE}(t) = \varepsilon_C(t) - \varepsilon_E(t)$$

Момент инерции ротора электродвигателя, приведенный к оси вращения рабочих валков, значительно превышает сумму моментов инерции остальных вращающихся масс привода: $J_A \gg J_B + J_C + J_D + J_E$. По этой причине угловое ускорение ротора (диск А) можно принять равным нулю, а математическая модель привода приобретает следующий вид [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_A(t) = 0 \\ \varepsilon_B(t) = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} \\ \varepsilon_C(t) = \frac{M_{BC}(t) - M_{CD}(t) - M_{CE}(t)}{J_C} \\ \varepsilon_D(t) = \frac{M_{CD}(t) - M_D(t)}{J_D} \\ \varepsilon_E(t) = \frac{M_{CE}(t) - M_E(t)}{J_E} \end{array} \right.$$

ИЛИ

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{AB}(t) = 0 - \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} \\ \varepsilon_{BC}(t) = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} - \frac{M_{BC}(t) - M_{CD}(t) - M_{CE}(t)}{J_C} \\ \varepsilon_{CD}(t) = \frac{M_{BC}(t) - M_{CD}(t) - M_{CE}(t)}{J_C} - \frac{M_{CD}(t) - M_D(t)}{J_D} \\ \varepsilon_{CE}(t) = \frac{M_{BC}(t) - M_{CD}(t) - M_{CE}(t)}{J_C} - \frac{M_{CE}(t) - M_E(t)}{J_E} \end{array} \right.$$

Продолжительность захвата заготовки рабочими валками $T_{зах} \approx 0,06$ [с].

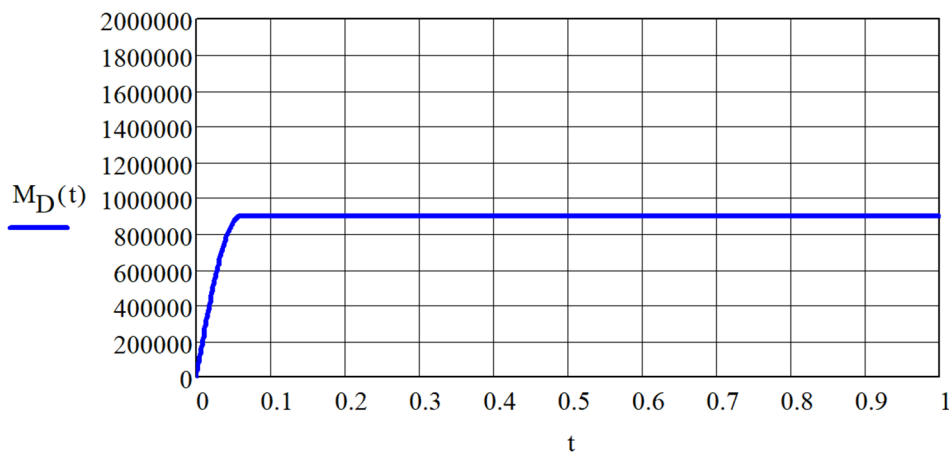
Угловая скорость рабочих валков

$$\omega_{вал} = \frac{\pi}{2 T_{зах}} \approx 26 \text{ [рад/с]} \approx 248 \text{ [об/мин]}.$$

Внешние моменты прокатки заданы в виде нелинейных (синусоидальных) функций времени (рис. 3):

$$M_D(t) = \begin{cases} M_D \cdot \sin(\omega_{вал} t) & \text{при } t < T_{зах} \\ M_D & \text{при } t \geq T_{зах} \end{cases}$$

$$M_E(t) = \begin{cases} M_E \cdot \sin(\omega_{вал} t) & \text{при } t < T_{зах} \\ M_E & \text{при } t \geq T_{зах} \end{cases}$$



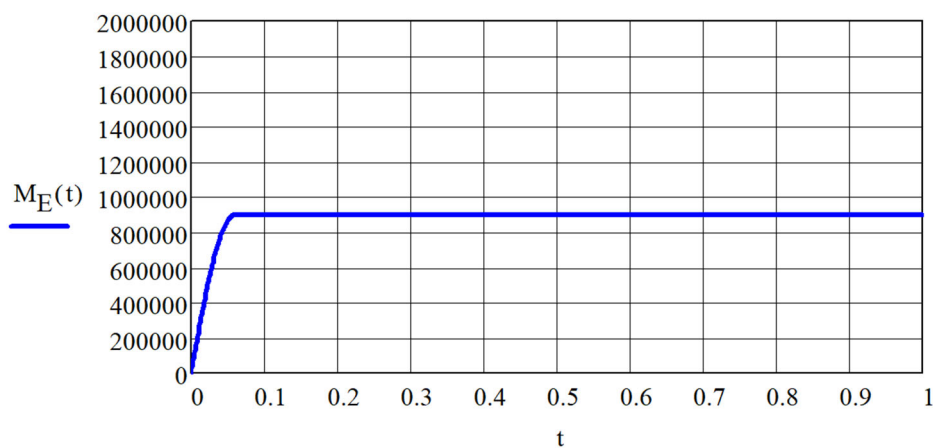


Рисунок 3. Графики (MathCAD) внешних моментов прокатки

Упругодемпфирующие моменты [Н · м] связей с учетом люфтов (рис. 4)

$$M_{AB}(t) == \begin{cases} C_{AB} \left(\varphi_{AB}(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AB}(t)) \right) + \beta_{AB} \omega_{AB}(t), & \text{при } |\varphi_{AB}(t)| \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{AB}(t)| < \frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases}$$

$$M_{BC}(t) == \begin{cases} C_{BC} \left(\varphi_{BC}(t) - \frac{\Delta_{BC}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{BC}(t)) \right) + \beta_{BC} \omega_{BC}(t), & \text{при } |\varphi_{BC}(t)| \geq \frac{\Delta_{BC}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{BC}(t)| < \frac{\Delta_{BC}}{2} \end{cases}$$

$$M_{CD}(t) == \begin{cases} C_{CD} \left(\varphi_{CD}(t) - \frac{\Delta_{CD}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{CD}(t)) \right) + \beta_{CD} \omega_{CD}(t), & \text{при } |\varphi_{CD}(t)| \geq \frac{\Delta_{CD}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{CD}(t)| < \frac{\Delta_{CD}}{2} \end{cases}$$

$$M_{CE}(t) == \begin{cases} C_{CE} \left(\varphi_{CE}(t) - \frac{\Delta_{CE}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{CE}(t)) \right) + \beta_{CE} \omega_{CE}(t), & \text{при } |\varphi_{CE}(t)| \geq \frac{\Delta_{CE}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{CE}(t)| < \frac{\Delta_{CE}}{2} \end{cases}$$

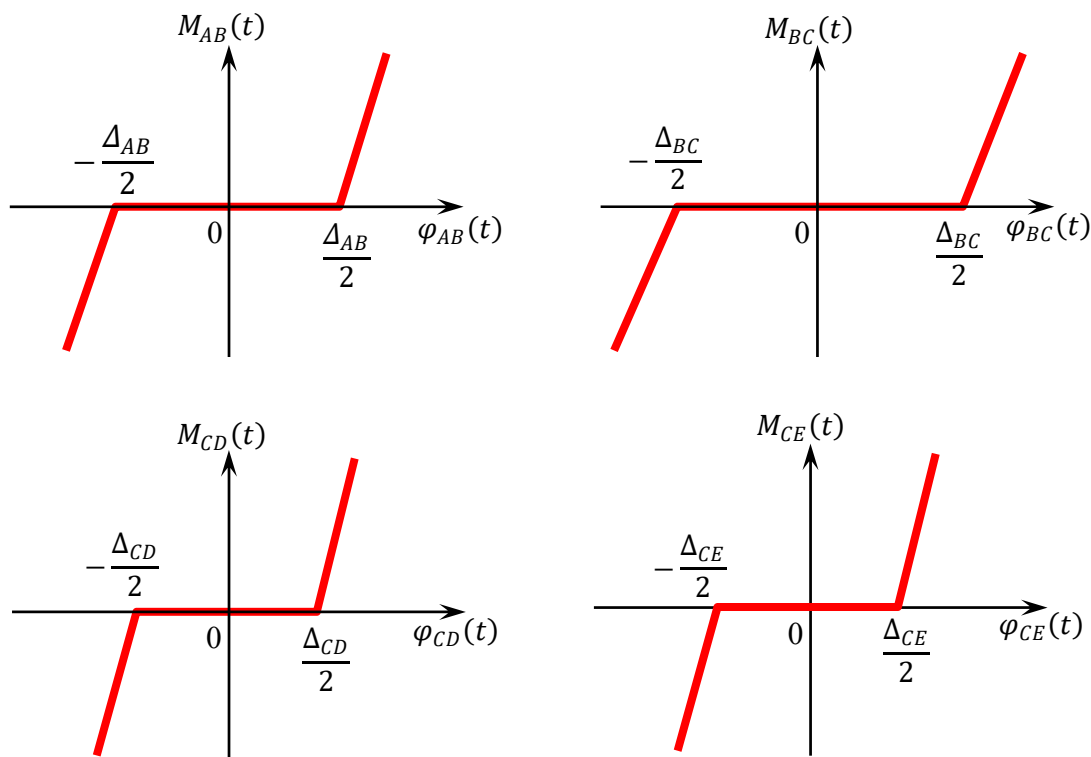


Рисунок 4. Люфты в упругих связях

В момент времени $t = 0$ процесс прокатки полосы еще не начался, поэтому приняты нулевые начальные условия:

$$M_D(0) = M_E(0) = 0$$

$$\varphi_{AB}(0) = \varphi_{BC}(0) = \varphi_{CD}(0) = \varphi_{CE}(0) = 0$$

$$\omega_{AB}(0) = \omega_{BC}(0) = \omega_{CD}(0) = \omega_{CE}(0) = 0$$

$$\varepsilon_{AB}(0) = \varepsilon_{BC}(0) = \varepsilon_{CD}(0) = \varepsilon_{CE}(0) = 0$$

$$M_{AB}(0) = M_{BC}(0) = M_{CD}(0) = M_{CE}(0) = 0$$

Получены графические результаты математического моделирования: наибольший интерес представляет компьютерный график изменения во времени упругодемпфирующего момента $M_{AB}(t)$ [Н·м], поскольку на участке АВ расположен электродвигатель, требующий отдельного изучения [3].

Нагрузка на выходном валу электродвигателя (рис. 5)

$$M_{эд}(t) = M_{AB}(t)/i,$$

где передаточное число редуктора $i \approx 3$.

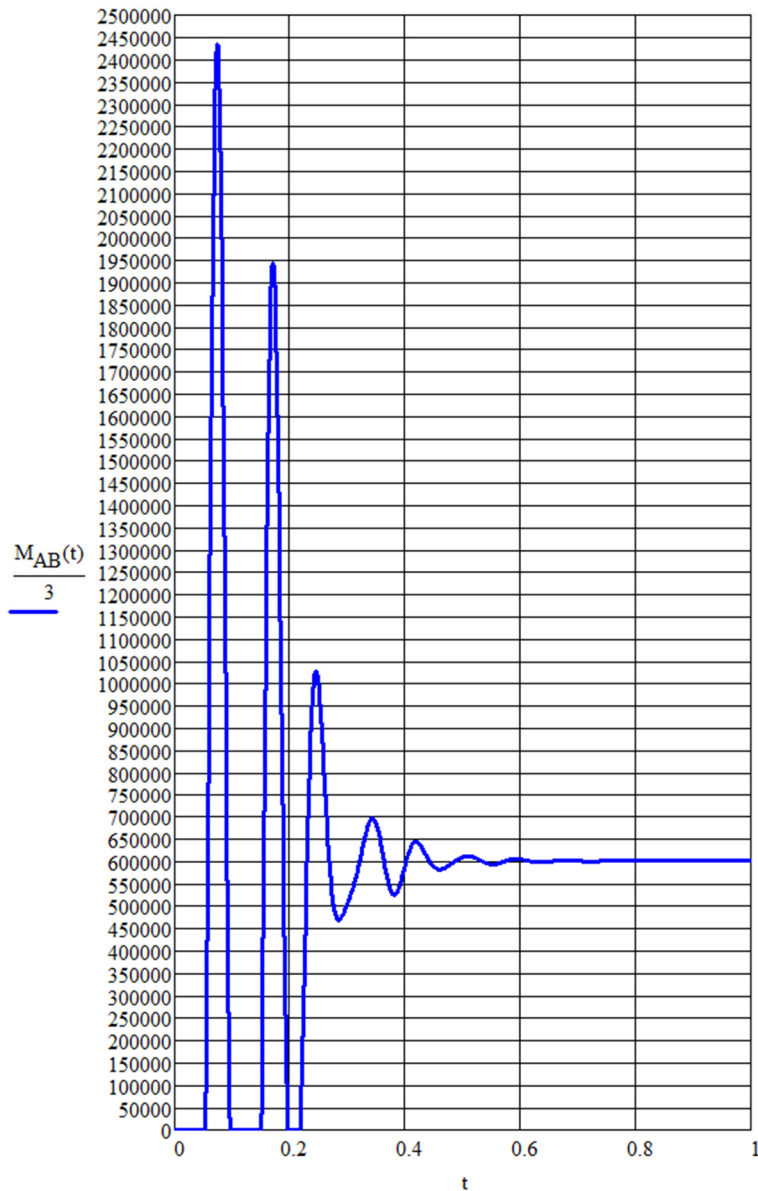


Рисунок 5. График нагружения выходного вала электродвигателя

На графике найдены следующие экстремумы: 2450, 0, 1950, 0, 1050, 500, 700, 550, 650 [кН · м] (рис. 6). Принято допущение, что нагрузка на выходном валу электродвигателя равна нулю в самом начале и в самом конце прокатки полосы (холостой ход привода).

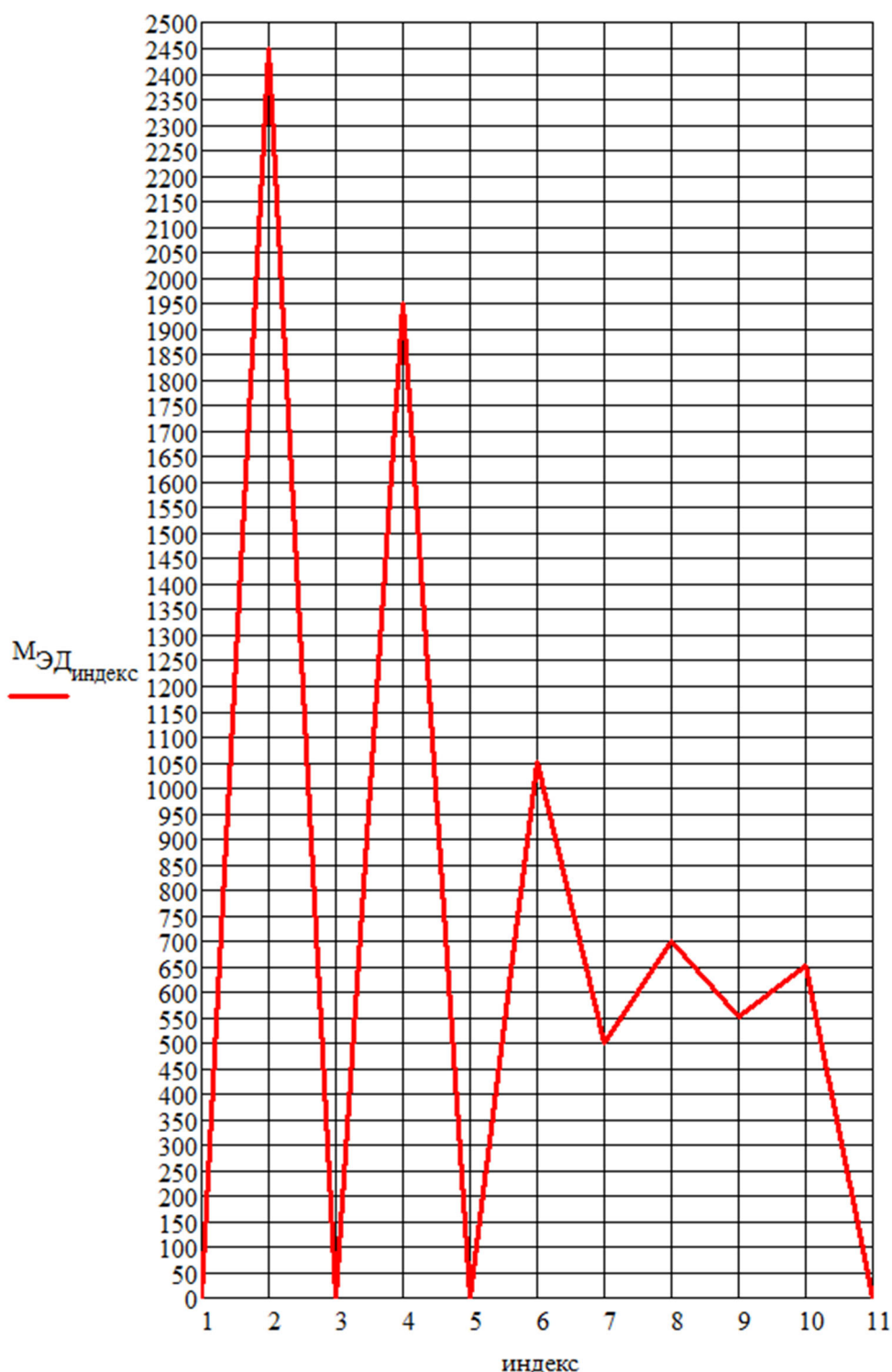


Рисунок 6. Экстремумы на графике нагружения

График нагружения выходного вала электродвигателя обработан методом полных циклов с учетом требований ГОСТ 25.101-83 (Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов):

- выделен первый цикл с размахом от 650 до 550 [кН · м];
- выделен второй цикл с размахом от 700 до 500 [кН · м];
- выделен третий цикл с размахом от 1050 до 0 [кН · м];
- выделен четвертый цикл с размахом от 1950 до 0 [кН · м];
- выделен пятый цикл с размахом от 2450 до 0 [кН · м].

В результате обработки графика двухпараметрическим методом полных циклов вычислены амплитудные M_{ai} и средние M_{mi} значения выделенных циклов нагружения:

$$\begin{aligned}M_{a1} &= \frac{|650 - 550|}{2} = 50 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{a2} &= \frac{|700 - 500|}{2} = 100 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{a3} &= \frac{|1050 - 0|}{2} = 525 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{a4} &= \frac{|1950 - 0|}{2} = 975 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{a5} &= \frac{|2450 - 0|}{2} = 1225 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{m1} &= \frac{650 + 550}{2} = 600 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{m2} &= \frac{700 + 500}{2} = 600 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{m3} &= \frac{1050 + 0}{2} = 525 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{m4} &= \frac{1950 + 0}{2} = 975 \text{ [кН} \cdot \text{м]} \\M_{m5} &= \frac{2450 + 0}{2} = 1225 \text{ [кН} \cdot \text{м]}\end{aligned}$$

Заключение

Спектр амплитудных и средних значений циклов нагружения является решением задачи анализа нагружения выходного вала электродвигателя пятой клетки НШС 2000 НЛМК крутящим моментом при прокатке полосы 1,2×1250 из стали ЗКП (рис 7).

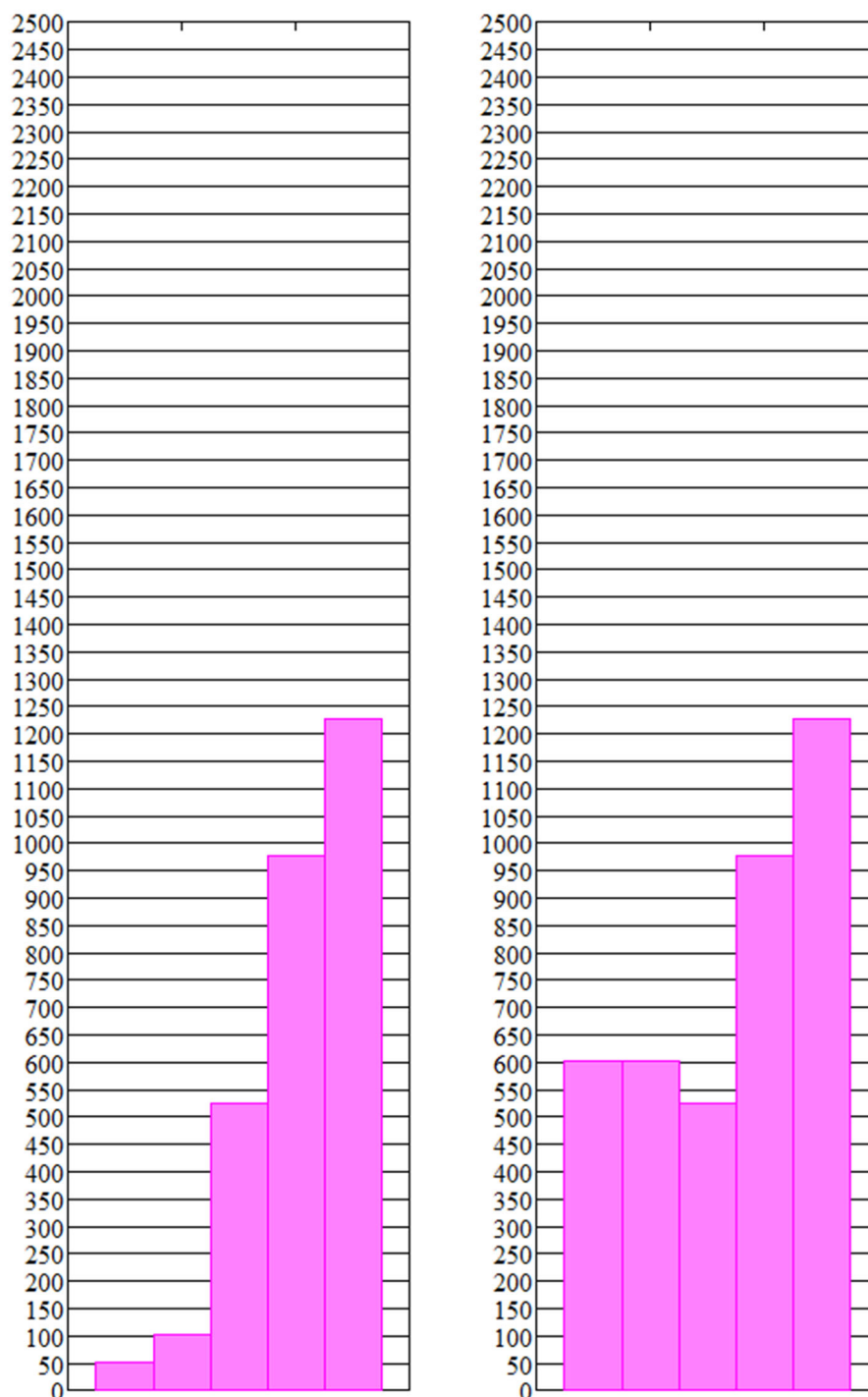


Рисунок 7. Спектр нагружения выходного вала электродвигателя

Список литературы:

1. 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.
2. 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.
3. Красовский А.Б. Основы электропривода: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 405 с.

References:

1. Yakovlev R.A. Limitation of dynamic loads in metallurgical machines: textbook for the course "Fundamentals of metallurgical machine dynamics". – Moscow: BMSTU, 1990. – 36 p.
2. Maltsev A.A., Filatov A.A. Assessment of the level of torsional vibrations in the drive of the No. 5 stand of the continuous broadband mill 2000 by computer modeling // Procurement in mechanical engineering. 2024. Vol. 22, №9. – Pp. 417–425.
3. Krasovsky A.B. Fundamentals of electric drive: textbook. – Moscow: BMSTU, 2015. – 405 p.