

УДК 621.771

**СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КРУТИЛЬНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ
МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДУО-160****Мальцев Андрей Анатольевич,**

к.т.н., доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Путем сокращения числа массивных дисков с девяти до четырех оптимизирована крутильно-колебательная модель электропривода рабочих валков прокатного стана дуо-160 на стадии его учебного проектирования.

Ключевые слова: электропривод, металлургия, колебания, проектирование.

**TORSIONAL-OSCILLATORY MODEL STRUCTURAL OPTIMIZATION OF
DUO-160 ELECTRIC DRIVE****Andrey A. Maltsev,**

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Engineering,

BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

By reducing the number of massive disks from nine to four, the torsional-oscillatory model of the electric drive of the working rolls of the duo-160 rolling mill at the stage of its educational design has been optimized.

Keywords: electric drive, metallurgy, vibrations, design.

Объект исследования.

Объектом исследования является групповой электропривод рабочих валков экспериментального прокатного стана дуо-160, который находится на стадии учебного проектирования (рис. 1).

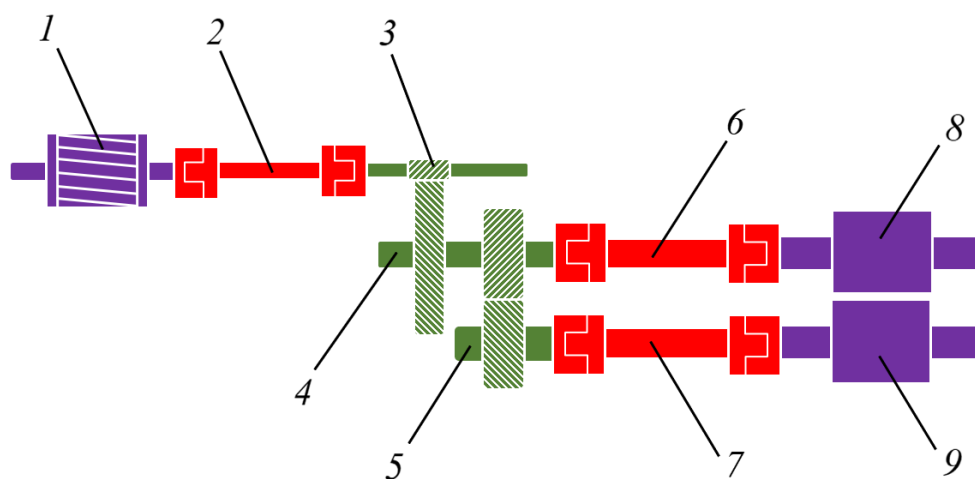


Рисунок 1. Физическая модель электропривода дуо-160:

- 1 – ротор электродвигателя;
- 2 – моторный тензометрический вал-шпиндель;
- 3 – вал-шестерня;
- 4 – верхний шестеренный валок с зубчатым колесом;
- 5 – нижний шестеренный валок;
- 6 – верхний тензометрический вал-шпиндель;
- 7 – нижний тензометрический вал-шпиндель;
- 8 – верхний рабочий валок;
- 9 – нижний рабочий валок

Новый прокатный стан будет оснащен диагностической аппаратурой с функцией прогнозирования остаточного ресурса деталей и узлов, для чего на трех участках автоматизированного электропривода планируется установить моторный, верхний и нижний специальные тензометрические валы-шпиндели – измерители динамического крутящего момента.

Предмет исследования.

На предварительном этапе творческо-конструкторских работ студентам потребуется изучить характер крутильно-колебательных процессов на всех трех участках электропривода при ударе прокатываемой заготовки о рабочие валки (рис. 2).

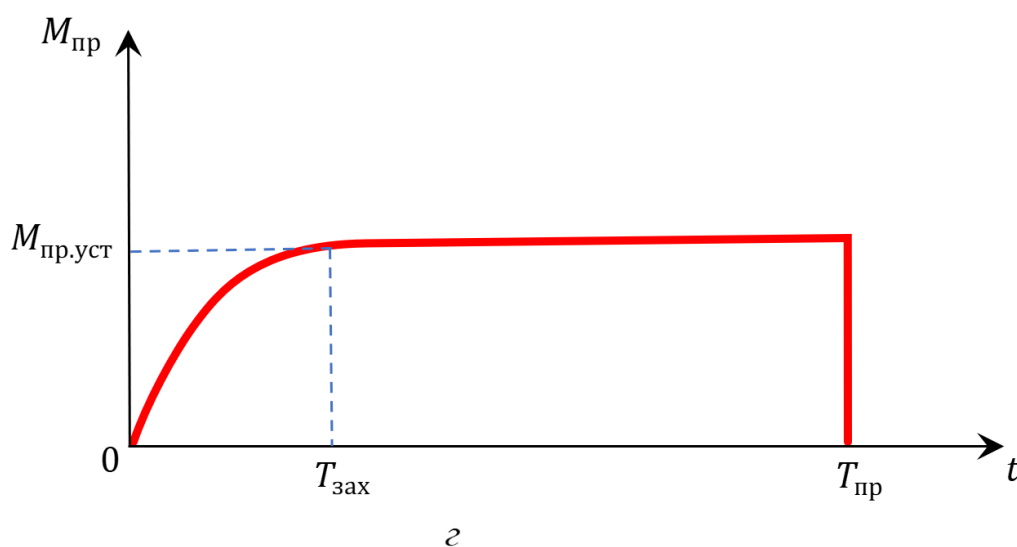
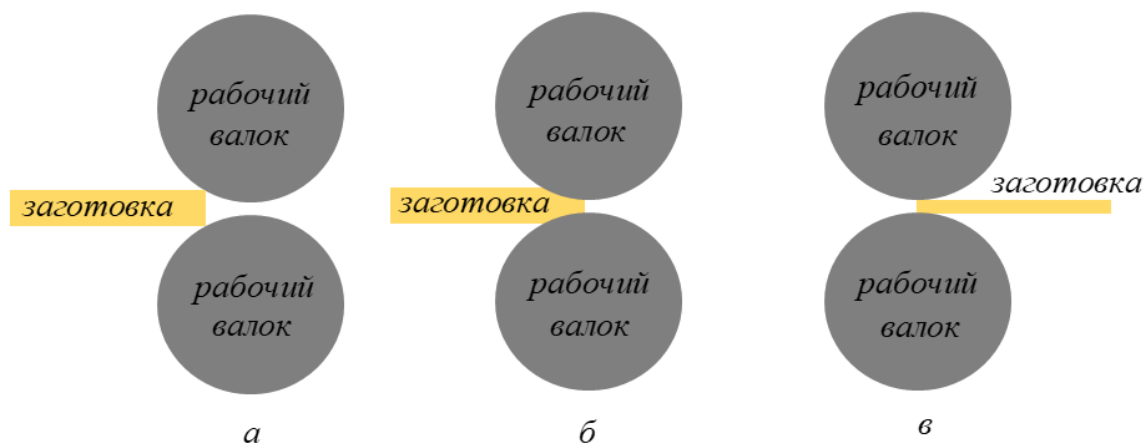


Рисунок 2. Очаг деформации дуо-160:

а – заготовка ударилась о рабочие валки ($t = 0$);

б – заготовка захвачена рабочими валками ($t = T_{зах}$);

в – заготовка прокатана рабочими валками ($t \geq T_{пр}$);

г – график нарастания момента прокатки $M_{пр}$ во времени t от нуля до установившегося значения $M_{пр.уст}$

Цель исследования

Исследование проводится с целью устранения разрыва между теорией (математические методы классической механики), изученной студентами на младших курсах, и ее практическим применением в учебном конструировании новых прокатных машин при выполнении курсовых и дипломного проектов, а также студенческой научно-исследовательской работы (НИРС).

Электропривод рабочих валков прокатного стана дуо-160 соизмерим с размерами человека и является объектом макромира, в связи с чем имеются основания для построения его крутильно-колебательной модели на принципах классической ньютоновской механики.

Функция Лагранжа (Лагранжиан) вводится как разность кинетической и потенциальной энергий механической системы:

$$L = T - U . \quad (1)$$

На основании утверждения (1) записываются уравнения Лагранжа 2 рода, представляющие собой дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial q_i} = Q_i , \quad (2)$$

где

t – время;

T – кинетическая энергия крутильно-колебательной системы;

U – потенциальная энергия крутильно-колебательной системы;

R – работа сил рассеивания (диссипативная функция Релея);

q_i – обобщенные координаты;

\dot{q}_i – обобщенные скорости;

Q_i – обобщенные внешние силы;

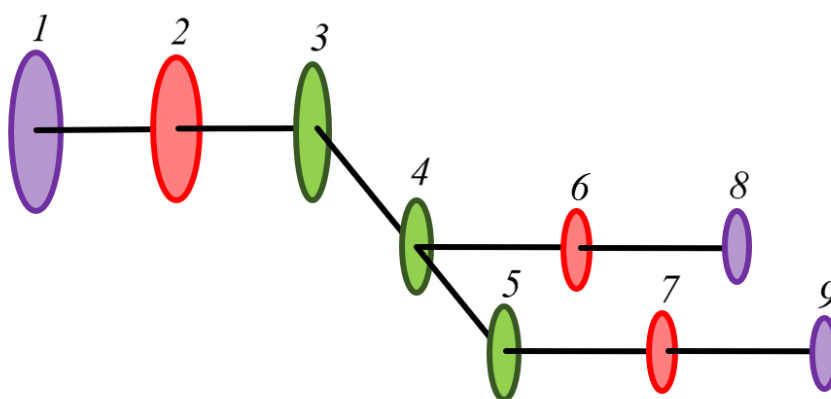
$i = 1, 2, \dots, n$;

n – число степеней свободы системы.

Задача исследования

С точки зрения классической механики групповой электропривод проектируемого прокатного стана дуо-160 может быть представлен в виде линейной диссипативной крутильно-колебательной системы, состоящей из нескольких сосредоточенных масс (абсолютно жестких массивных дисков), соединенных между собой упругими невесомыми связями.

Для уменьшения числа степеней свободы системы в математической записи (2) необходимо на сколько возможно упростить структуру крутильно-колебательной модели электропривода дуо-160 (рис. 3).



a

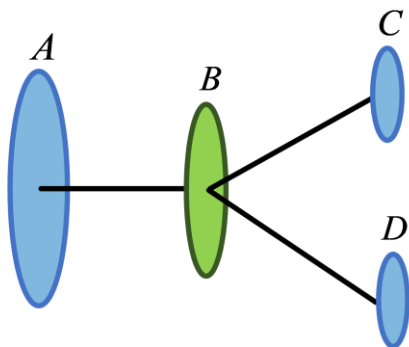


Рисунок 3. Крутильно-колебательная модель электропривода дуо-160:

а – первоначальная 9-массовая структура;

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 – абсолютно жесткие массивные диски;

б – оптимизированная 4-массовая структура;

А, В, С, D – массивные диски после структурной оптимизации

Материалы исследования

На предварительном этапе учебного проектирования уже известны следующие приблизительные значения параметров крутильно-колебательной модели электропривода рабочих валков прокатного стана дуо-160:

Осевые моменты инерции массивных дисков 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9:

$J_1 = 2$ [кг · м²] – момент инерции ротора электродвигателя;

$J_2 = 1,5$ [кг · м²] – момент инерции моторного вала-шпинделя;

$J_3 = 1$ [кг · м²] – момент инерции вала-шестерни;

$J_4 = 0,4$ [кг · м²] – момент инерции верхнего шестеренного валка;

$J_5 = 0,3$ [кг · м²] – момент инерции нижнего шестеренного валка;

$J_6 = 0,1$ [кг · м²] – момент инерции верхнего вала-шпинделя;

$J_7 = 0,1$ [кг · м²] – момент инерции нижнего вала-шпинделя;

$J_8 = 0,2$ [кг · м²] – момент инерции верхнего рабочего валка;

$J_9 = 0,2$ [кг · м²] – момент инерции нижнего рабочего валка;

Крутильные жесткости и моменты сил упругости невесомых связей:

$C_{12} = 100\,000$ [Н · м/рад]; $M_{12} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$;

$C_{23} = 100\,000$ [Н · м/рад]; $M_{23} = C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)$;

$C_{34} = 200\,000$ [Н · м/рад]; $M_{34} = C_{34}(\varphi_3 - \varphi_4)$;

$C_{45} = 200\,000$ [Н · м/рад]; $M_{45} = C_{45}(\varphi_4 - \varphi_5)$;

$C_{46} = 50\,000$ [Н · м/рад]; $M_{46} = C_{46}(\varphi_4 - \varphi_6)$;

$C_{57} = 50\,000$ [Н · м/рад]; $M_{57} = C_{57}(\varphi_5 - \varphi_7)$;

$C_{68} = 30\,000$ [Н · м/рад]; $M_{68} = C_{68}(\varphi_6 - \varphi_8)$;

$C_{79} = 30\,000$ [Н · м/рад]; $M_{79} = C_{79}(\varphi_7 - \varphi_9)$,

где $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_9$ – угловые координаты дисков 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Внешние моменты:

$M_1 = 800$ [Н · м] – момент со стороны электродвигателя;

$M_8 = 500$ [Н · м] – момент прокатки на верхний рабочий валок;

$M_9 = 300$ [Н · м] – момент прокатки на нижний рабочий валок.

Осевые моменты инерции массивных дисков А, В, С, D:

$$J_A = J_1 + J_2 = 3,5 \text{ [кг · м}^2\text{]};$$

$$\begin{aligned} J_B &= J_3 + J_4 + J_5 = 1,7 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}; \\ J_C &= J_6 + J_8 = 0,3 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}; \\ J_D &= J_7 + J_9 = 0,3 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}. \end{aligned}$$

Крутильные жесткости невесомых упругих связей:

$$\begin{aligned} C_{AB} &= \frac{1}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{23}} + \frac{1}{C_{34}} + \frac{1}{C_{45}}} \approx 37\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}; \\ C_{BC} &= \frac{1}{\frac{1}{C_{46}} + \frac{1}{C_{68}}} \approx 19\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}; \\ C_{BD} &= \frac{1}{\frac{1}{C_{57}} + \frac{1}{C_{79}}} \approx 19\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}. \end{aligned}$$

Введены коэффициенты демпфирования:

$$\begin{aligned} \beta_{AB} &= 20 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/М]}; \\ \beta_{BC} &= 10 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/М]}; \\ \beta_{BD} &= 10 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/М]}. \end{aligned}$$

Тогда моменты сил упругости невесомых связей

$$\begin{aligned} M_{AB} &= C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B) + \beta_{AB} \left(\frac{d\varphi_A}{dt} - \frac{d\varphi_B}{dt} \right); \\ M_{BC} &= C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C) + \beta_{BC} \left(\frac{d\varphi_B}{dt} - \frac{d\varphi_C}{dt} \right); \\ M_{BD} &= C_{BD}(\varphi_B - \varphi_D) + \beta_{BD} \left(\frac{d\varphi_B}{dt} - \frac{d\varphi_D}{dt} \right). \end{aligned}$$

Начальные угловые координаты, скорости, ускорения и моменты

$$\begin{aligned} \varphi_A(0) &= \varphi_B(0) = \varphi_C(0) = \varphi_D(0) = 0 \text{ [рад]}; \\ \frac{d\varphi_A(0)}{dt} &= \frac{d\varphi_B(0)}{dt} = \frac{d\varphi_C(0)}{dt} = \frac{d\varphi_D(0)}{dt} = 0 \text{ [рад/с]}; \\ \frac{d^2\varphi_A(0)}{dt^2} &= \frac{d^2\varphi_B(0)}{dt^2} = \frac{d^2\varphi_C(0)}{dt^2} = \frac{d^2\varphi_D(0)}{dt^2} = 0 \text{ [рад/с}^2\text{]}; \\ M_{AB}(0) &= M_{BC}(0) = M_{BD}(0) = 0 \text{ [Н} \cdot \text{М]}. \end{aligned}$$

Метод исследования

Для исследования электропривода прокатного стана дуо-160 методом математического моделирования уравнения Лагранжа (2) преобразованы к следующему виду [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + M_{12} &= M_1; \\ J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} - M_{12} + M_{23} &= 0; \\ J_3 \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} - M_{23} + M_{34} &= 0; \\ J_4 \frac{d^2\varphi_4}{dt^2} - M_{34} + M_{45} + M_{46} &= 0; \\ J_5 \frac{d^2\varphi_5}{dt^2} - M_{45} + M_{57} &= 0; \\ J_6 \frac{d^2\varphi_6}{dt^2} - M_{46} + M_{68} &= 0; \end{aligned}$$

$$J_7 \frac{d^2 \varphi_7}{dt^2} - M_{57} + M_{79} = 0;$$

$$J_8 \frac{d^2 \varphi_8}{dt^2} - M_{68} = -M_8;$$

$$J_9 \frac{d^2 \varphi_9}{dt^2} - M_{79} = -M_9.$$

После структурной оптимизации количество уравнений уменьшилось до четырех:

$$J_A \frac{d^2 \varphi_A}{dt^2} + M_{AB} = M_A = M_1;$$

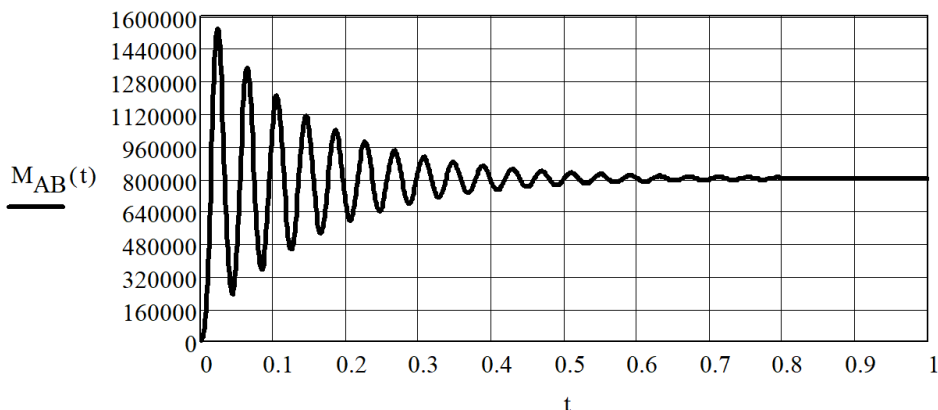
$$J_B \frac{d^2 \varphi_B}{dt^2} - M_{AB} + M_{BC} + M_{BD} = 0;$$

$$J_C \frac{d^2 \varphi_C}{dt^2} - M_{BC} = -M_C = -M_8;$$

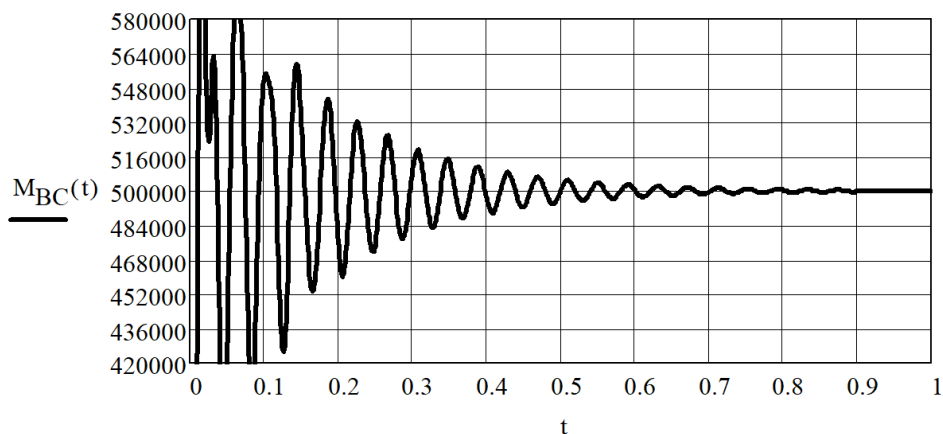
$$J_D \frac{d^2 \varphi_D}{dt^2} - M_{BD} = -M_D = -M_9;$$

Результаты исследования.

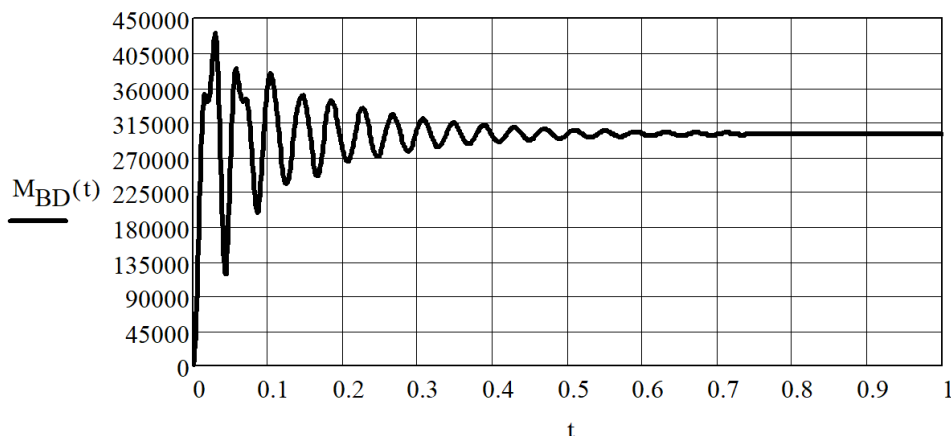
В компьютерной среде MathCAD построены графики моментов сил упругости $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{BD}(t)$. На всех трех участках электропривода видны значительные крутильные колебания (рис. 4).



а



б

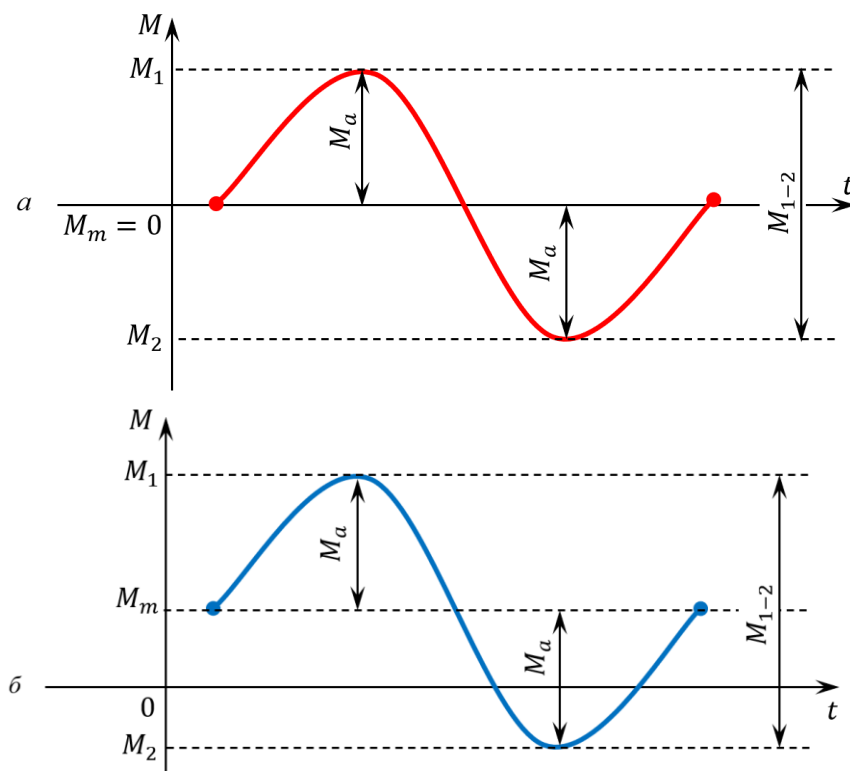


в

Рисунок 4. Компьютерные MathCAD-графики:
 а – участок АВ; б – участок ВС; в – участок ВД

Заключение.

Анализ крутильно-колебательного переходного процесса на всех трех участках электропривода дуо-160 позволит в дальнейшем выделить полные асимметричные циклы нагружения одним из методов двухпараметрической (параметры M_a и M_m) обработки (рис. 5).



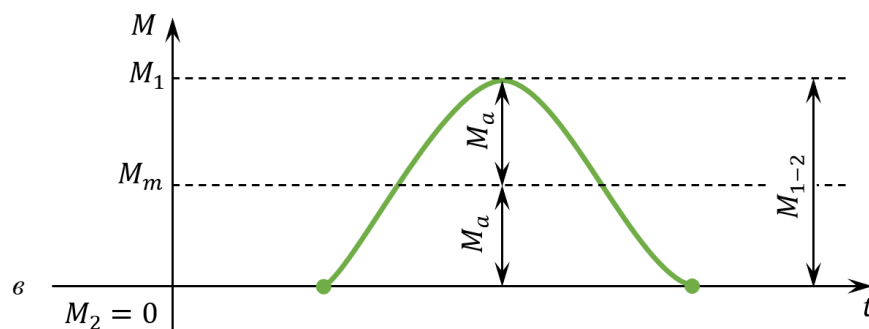


Рисунок 5. Виды циклов нагружения крутящим моментом:

а — симметричный; б — асимметричный; в — пульсирующий;

 M — крутящий момент [Н·м]; t — время [с]; M_1, M_2 — экстремумы; M_{1-2} — размах; M_a — амплитуда; M_m — среднее значение цикла

Двухпараметрическая обработка каждого компьютерного графика будет произведена с обязательной регистрацией размахов, амплитуд и средних значений выделенных циклов (табл. 1).

Таблица 1

Результаты обработки MathCAD-графика

Экстремумы		Размахи, [Н·м]	Амплитуды, [Н·м]	Средние значения, [Н·м]
Максимумы, [Н·м]	Минимумы, [Н·м]			
M_1	M_2	M_{1-2}	M_a	M_m
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Список литературы.

1. Мальцев А.А. Оптимизация параметров крутильно-колебательной модели электропривода прокатного стана средствами Simulink. — [Электронный ресурс] // Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. т.11, №7. С.109–119. — Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-7-2021/a230351>
2. Мальцев А.А. Оптимизация параметров Simulink-модели электропривода прокатного стана по критерию минимизации длительности переходного процесса. — [Электронный ресурс] // Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №8. С.67–81. — Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-8-2021/a230367>
3. Мальцев А.А. Параметрическая оптимизация Simulink-модели электропривода прокатного стана по критерию минимизации динамических нагрузок. — [Электронный ресурс] // Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №9.

С.127–141. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-9-2021/a230390>

References.

1. Andrey A. Maltsev. Optimization of the parameters of the torsional-oscillatory model of the electric drive of the rolling mill by means of Simulink. – [Electronic resource] // Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.7. P.109–119. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-7-2021/a230351>.
2. Andrey A. Maltsev. Optimization of the parameters of the Simulink model of the electric drive of the rolling mill according to the criterion of minimizing the duration of the transition process. – [Electronic resource] // Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.8. P.67–81. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-8-2021/a230367>
3. Мальцев А.А. Parameter optimization of the electric drive Simulink model of a rolling mill according to the criterion of minimizing the dynamic loads. – [Electronic resource] // Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.9. P.127–141. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-9-2021/a230390>