

УДК 621.3

**К ВОПРОСУ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КРУТИЛЬНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,  
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Тарасенко Ирина Александровна,**старший преподаватель кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,  
e-mail: iri-tarasenko@yandex.ru**Аннотация**

Разработан и апробирован на прокатном стане дуо-160 алгоритм обучения студентов навыку научного исследования крутильных колебаний, возникающих в механической части электропривода рабочей клетки после захвата прокатываемой заготовки рабочими валками.

**Ключевые слова:** электродвигатель, прокатный стан, моделирование.

**ON THE ISSUE OF SCIENTIFIC RESEARCH OF TORSIONAL VIBRATIONS  
IN THE MECHANICAL PART OF AN ELECTRIC DRIVE****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,  
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Irina A. Tarasenko,**senior lecturer of BMSTU ФН-7 department,  
e-mail: iri-tarasenko@yandex.ru**ABSTRACT**

An algorithm has been developed and tested at the duo-160 rolling mill to teach students the skill of scientific research of torsional vibrations that occur in the mechanical part of the electric drive of the working crate after the rolled workpiece is captured by working rolls.

**Keywords:** electric motor, rolling mill, simulation.

Прокатный стан дуо-160 с двумя одноступенчатыми цилиндрическими редукторами находится на территории МГТУ им. Н.Э. Баумана в лаборатории имени академика А.И. Целикова, относящейся к кафедре «Оборудование и технологии прокатки» (рис. 1).

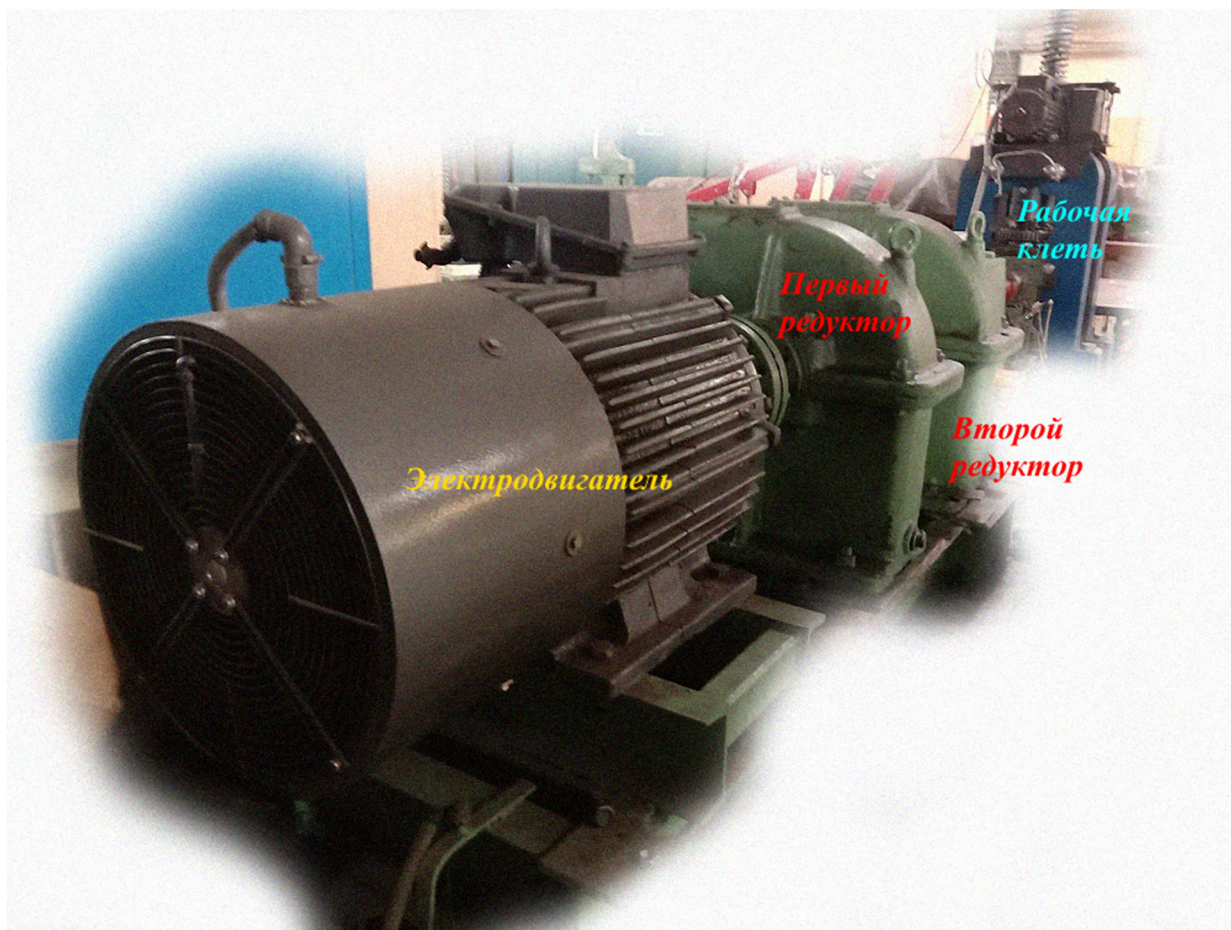


Рисунок 1. Прокатный стан дуо-160

В рамках курсового или дипломного проектирования перед студентами, осваивающими специальность «Проектирование технологических машин и комплексов», могут быть поставлены различные исследовательские задачи с целью реконструировать электропривод рабочих валков этого прокатного стана путем замены двух одноступенчатых цилиндрических редукторов, общее передаточное число которых равно 20, на один двухступенчатый цилиндрический редуктор, с соблюдением передаточного числа (рис. 2).

Техническая характеристика лабораторного стана дуо 160 (ХПЛ-160 с двумя редукторами)	
Общие сведения	
1. Назначение стана	ХПЛ 160
2. Тип стана	ДУО
3. Реверсивность	Да
4. Максимальная ширина проката	120-125 мм
5. Скорость прокатки	0,4 м/с
Привод	
1. Электродвигатель	
а. тип	Асинхронный
б. мощность	22 кВт
с. число оборотов	976 об/мин
д. реверсивность	Да
е. регулируемость числа оборотов	Да
2. Редуктор	
а. тип	Цилиндрический с косозуб. зацеплением
б. число ступеней	1
с. общее передаточное число	20
3. Шестерённая клеть	
	Шевронное зацепление, d=160 мм
4. Муфты	
	Зубчатые, пальцевые
5. Шпиндели	
	Универсальные
Рабочая клеть	
1. Станина	
а. тип	Закрытая
б. материал	Чугун ВЧ35-100
2. Рабочие валки	
а. материал	Сталь, чугун
б. диаметр валков	160
с. длина бочки валков	120
д. подшипники	7513 роликовые (2 шт)
3. Нажимное устройство	
	Винт-гайка
4. Устройство уравнивания	
	Пружинного типа

Рисунок 2. Техническая характеристика стана дуо-160

Объект научного исследования – механическая часть электропривода (МЧЭ) рабочих валков прокатного стана, которую составляют вращающиеся части электродвигателя (ротор), моторная муфта, вращающиеся части первого редуктора (вал-шестерня и зубчатое колесо), муфта между редукторами, вращающиеся части второго редуктора (вал-шестерня и зубчатое колесо) коренная муфта, вращающиеся части шестеренной клетки (шестеренные валки) и универсальные шпиндели, а также сами рабочие валки.

Требуется разработать алгоритм обучения студентов навыку научного исследования переходного процесса (крутильные колебания), возникающего в МЧЭ после захвата прокатываемой заготовки рабочими валками.

Поставленная учебно-методическая задача решена методом пошаговой детализации, при котором исходная исследовательская задача разбивается на более простые и понятные подзадачи.

Первый шаг – изобразить кинематическую схему МЧЭ (рис. 3).

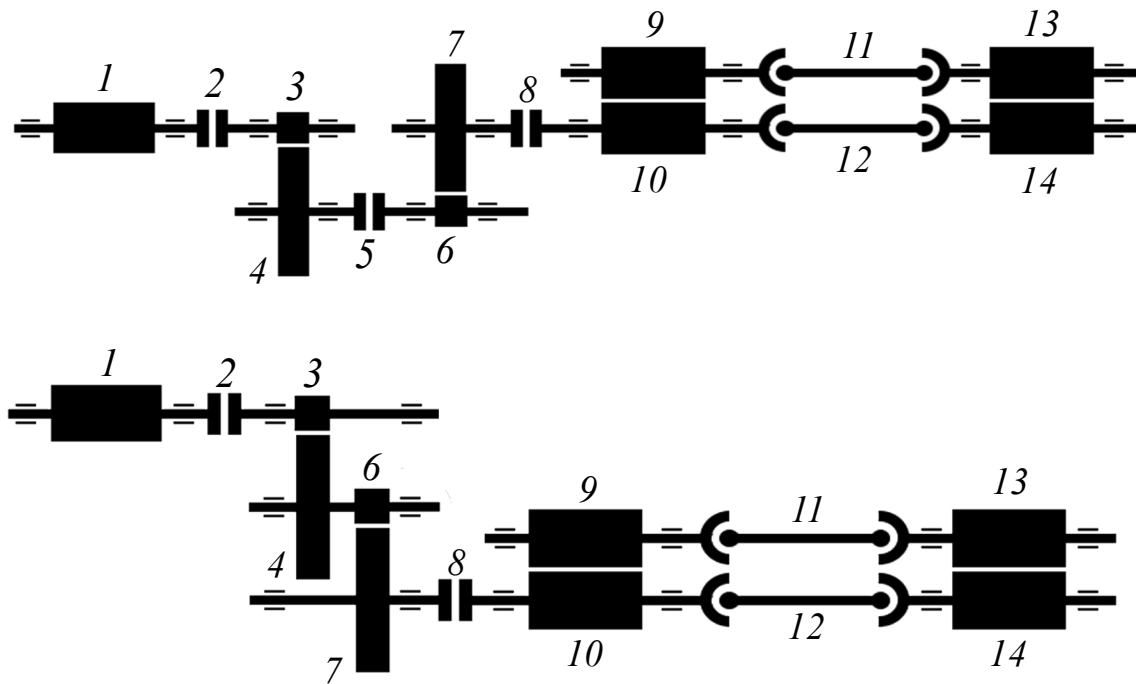


Рисунок 3. Кинематическая схема МЧЭ:

вверху – до реконструкции;

внизу – после реконструкции;

1 – ротор;

2, 5, 8 – муфты;

3, 6 – вал-шестерни;

4, 7 – зубчатые колеса;

9, 10 – шестеренные валки;

11, 12 – шпиндели;

13, 14 – рабочие валки

Второй шаг – построить физическую крутильно-колебательную модель МЧЭ, состоящую из трех массивных абсолютно жестких дисков и двух невесомых упругих валов, соединяющих эти диски (рис. 4).

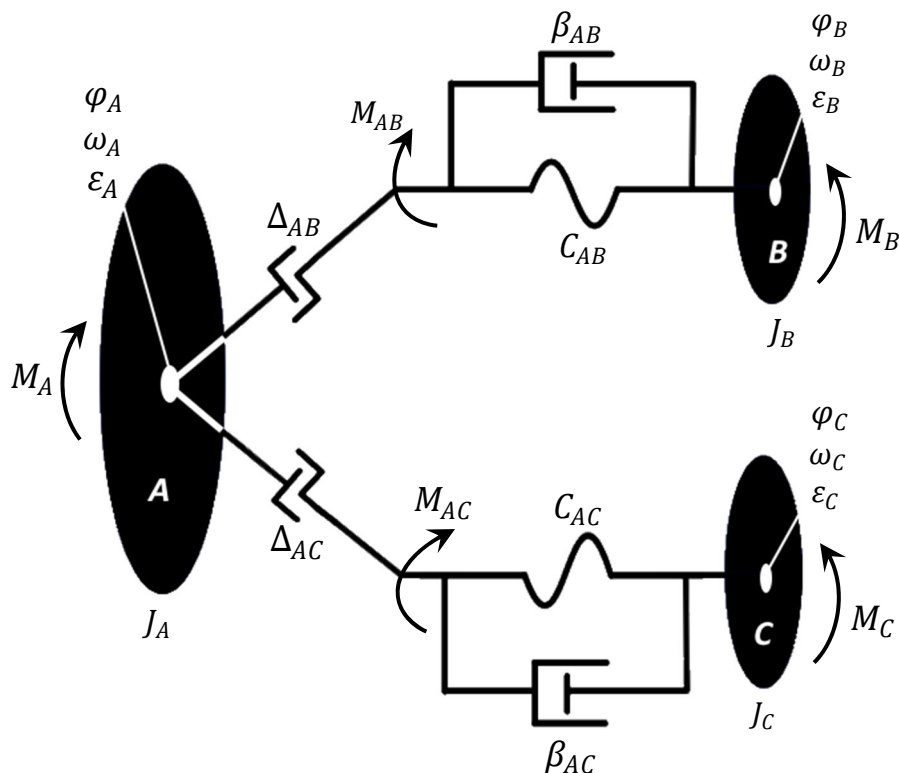


Рисунок 4. Расчетная схема МЧЭ:  
 диск А – ротор, муфты, вал-шестерни,  
 зубчатые колеса, шестеренные валки;  
 диск В – верхний рабочий валок;  
 диск С – нижний рабочий валок;  
 вал АВ – верхний шпиндель;  
 вал АС – нижний шпиндель

Разветвленная структура физической модели выбрана не случайно: существует неравномерность распределения момента прокатки на оба рабочих валка ( $M_B \neq M_C$ ), а также другие виды асимметрии нагружения параллельных участков МЧЭ, подробно рассмотренные в учебном пособии [1].

Третий шаг – идентифицировать постоянные во времени параметры физической модели МЧЭ (табл. 1) и наметить пути расчета переменных во времени параметров этой модели (табл. 2).

Таблица 1. Константы физической модели МЧЭ

Параметр	Обозначение	Размерность
Момент инерции	$J_A$	кг · м <sup>2</sup>
Момент инерции	$J_B$	кг · м <sup>2</sup>
Момент инерции	$J_C$	кг · м <sup>2</sup>
Жесткость	$C_{AB}$	Н · м/рад
Жесткость	$C_{AC}$	Н · м/рад
Люфт	$\Delta_{AB}$	рад
Люфт	$\Delta_{AC}$	рад
Демпфирование	$\beta_{AB}$	Н · м · с/рад

Демпфирование	$\beta_{AC}$	Н · м · с/рад
---------------	--------------	---------------

Таблица 2. Неизвестные параметры физической модели МЧЭ

Параметр	Обозначение	Размерность
Угловая координата	$\varphi_A(t)$	рад
Угловая координата	$\varphi_B(t)$	рад
Угловая координата	$\varphi_C(t)$	рад
Угловая скорость	$\omega_A(t) = d\varphi_A(t)/dt$	рад/с
Угловая скорость	$\omega_B(t) = d\varphi_B(t)/dt$	рад/с
Угловая скорость	$\omega_C(t) = d\varphi_C(t)/dt$	рад/с
Угловое ускорение	$\varepsilon_A(t) = d^2\varphi_A(t)/dt^2$	рад/с <sup>2</sup>
Угловое ускорение	$\varepsilon_B(t) = d^2\varphi_B(t)/dt^2$	рад/с <sup>2</sup>
Угловое ускорение	$\varepsilon_C(t) = d^2\varphi_C(t)/dt^2$	рад/с <sup>2</sup>

Четвертый шаг – для физической модели МЧЭ построить нагрузочные диаграммы в случае асимметричной прокатки, когда  $M_B \neq M_C$  (рис. 5):

$$M_B(t) = \begin{cases} \frac{K_B M_{уст} t}{T_{зах}} & \text{при } t < T_{зах} \\ K_B M_{уст} & \text{при } t \geq T_{зах} \end{cases} \quad (1)$$

$$M_C(t) = \begin{cases} \frac{K_C M_{уст} t}{T_{зах}} & \text{при } t < T_{зах} \\ K_C M_{уст} & \text{при } t \geq T_{зах} \end{cases} \quad (2)$$

где

$K_B$  и  $K_C$  – коэффициенты асимметрии момента прокатки ( $K_B + K_C = 1$ );

$M_{уст}$  [Н · м] – установившийся момент прокатки;

$T_{зах}$  [с] – продолжительность захвата заготовки рабочими валками;

$t$  [с] – переменная времени.

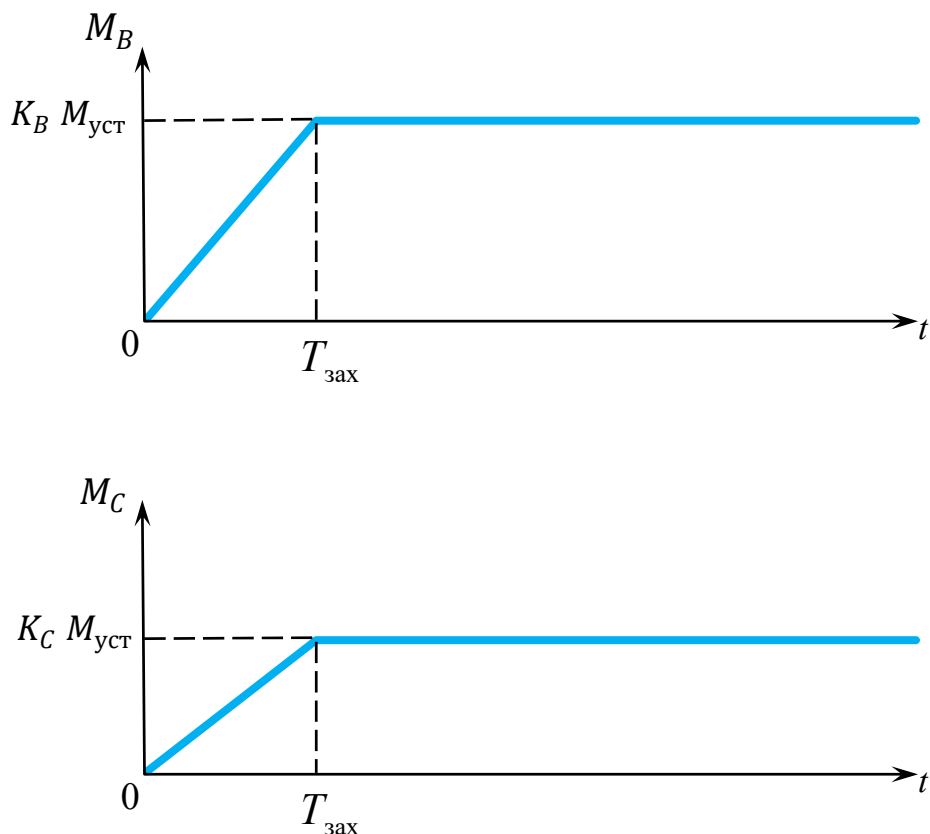


Рисунок 5. Нагрузочные диаграммы МЧЭ

Пятый шаг – построить естественную механическую характеристику трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным (рис. 6), пользуясь методическими указаниями [2] и [3].



Рисунок 6. Шильдик электродвигателя

Тип электродвигателя – 5А200М6БУЗ:

5А – серия;

200 – высота оси вращения [мм];

М – установочный размер по длине станины;

6 – число полюсов;

Б – специальное исполнение со встроенным термодатчиком;

УЗ – климатическое исполнение.

Номинальная механическая мощность электродвигателя

$$P_{2H} = 22 \text{ кВт}.$$

Номинальная частота вращения вала электродвигателя

$$n_H = 975 \text{ об/мин}.$$

Номинальный крутящий момент

$$M_H = \frac{9,55 \cdot P_{2H}}{n_H} = \frac{9,55 \cdot 22\,000}{975} \approx 215 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кратность максимального момента

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_H} = 2,2.$$

Максимальный вращающий момент

$$M_{max} = 2,2 M_H = 2,2 \cdot 215 = 473 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Частота питающей сети

$$f_1 = 50 \text{ Гц}.$$

Число пар полюсов электродвигателя

$$p = 3.$$

Частота вращения магнитного поля

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}.$$

Номинальное скольжение составляет 2,5 % :

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0,025.$$

Критическое скольжение составляет примерно 10,4 % :

$$s_{кр} = s_H \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,025 \cdot \left( 2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) \approx 0,104.$$

Естественная механическая характеристика электродвигателя (рис. 7) может быть построена по формуле Клосса:

$$M(s) = \frac{2 M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = \frac{2 \cdot 473}{\frac{s}{0,104} + \frac{0,104}{s}}. \quad (3)$$

$$n(s) = n_0(1 - s) = 1000 \cdot (1 - s). \quad (4)$$

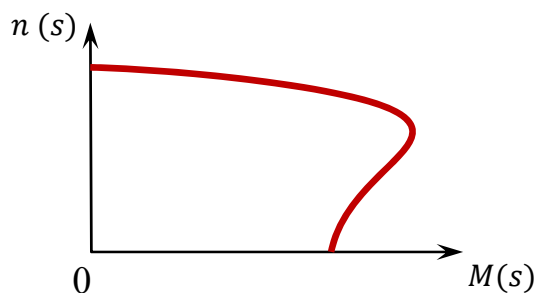


Рисунок 7. Механическая характеристика электродвигателя

Шестой шаг – для физической модели МЧЭ построить характеристики сил упругости валов АВ и АС (рис. 8):

$$M_{AB}(t) = \begin{cases} C_{AB} \left( \varphi_{AB}(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AB}(t) \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{AB}}{2} < \varphi_{AB}(t) < \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ C_{AB} \left( \varphi_{AB}(t) + \frac{\Delta_{AB}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AB}(t) \leq -\frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$M_{AC}(t) = \begin{cases} C_{AC} \left( \varphi_{AC}(t) - \frac{\Delta_{AC}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AC}(t) \geq \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{AC}}{2} < \varphi_{AC}(t) < \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ C_{AC} \left( \varphi_{AC}(t) + \frac{\Delta_{AC}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AC}(t) \leq -\frac{\Delta_{AC}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

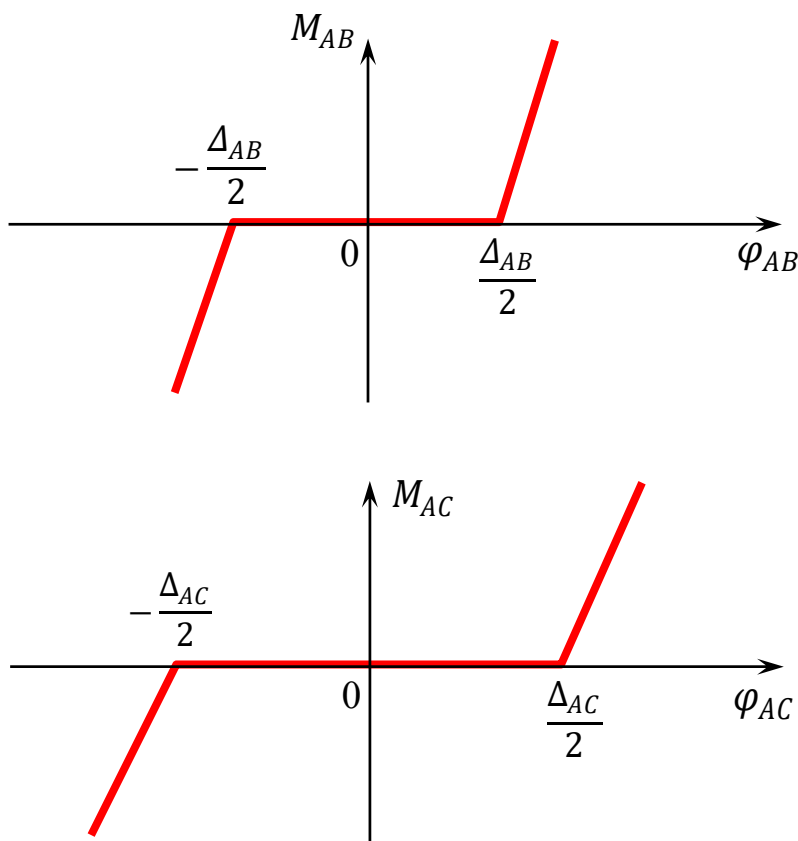


Рисунок 8. Характеристики сил упругости МЧЭ

Седьмой шаг – построить математическую крутильно-колебательную модель МЧЭ с учетом (1) – (6).

Уравнения крутильных колебаний МЧЭ имеют вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_A(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} \\ \varepsilon_B(t) = \frac{M_{AB}(t) - M_B(t)}{J_B} \\ \varepsilon_C(t) = \frac{M_{AC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{cases} \quad (7)$$

или

$$\begin{cases} \varepsilon_{AB}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_B(t)}{J_B} \\ \varepsilon_{AC}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_{AB}(t) &= \varepsilon_A(t) - \varepsilon_B(t) \\ \varepsilon_{AC}(t) &= \varepsilon_A(t) - \varepsilon_C(t) \end{aligned}$$

Упругодемпфирующий момент вала АВ с учетом люфта:

$$M_{AB}(t) = \begin{cases} C_{AB} \left( \varphi_{AB}(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AB}(t)) \right) + \\ + \beta_{AB} \omega_{AB}(t), \text{ при } |\varphi_{AB}(t)| \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0, \text{ при } |\varphi_{AB}(t)| < \frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

где

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

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

Упругодемпфирующий момент вала АС с учетом люфта:

$$M_{AC}(t) = \begin{cases} C_{AC} \left( \varphi_{AC}(t) - \frac{\Delta_{AC}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AC}(t)) \right) + \\ + \beta_{AC} \omega_{AC}(t), \text{ при } |\varphi_{AC}(t)| \geq \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ 0, \text{ при } |\varphi_{AC}(t)| < \frac{\Delta_{AC}}{2} \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\varphi_{AC}(t) = \varphi_A(t) - \varphi_C(t)$$

$$\omega_{AC}(t) = \omega_A(t) - \omega_C(t)$$

Начальные условия – нулевые:

$$\varphi_{AB}(0) = \varphi_{AC}(0) = 0$$

$$\omega_{AB}(0) = \omega_{AC}(0) = 0$$

$$\varepsilon_{AB}(0) = \varepsilon_{AC}(0) = 0$$

$$M_{AB}(0) = M_{AC}(0) = 0$$

$$M_A(0) = M_B(0) = M_C(0) = 0$$

В результате решения уравнений (7) или (8) с учетом (9) и (10) на ЭВМ будут получены графики упругодемпфирующих моментов (рис. 9).

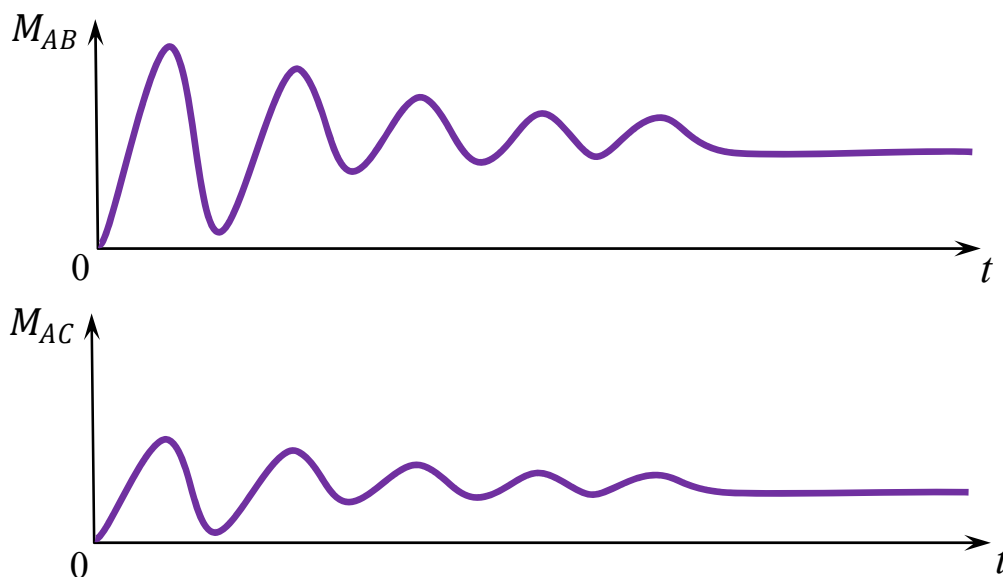


Рисунок 9. Переходный процесс в МЧЭ

#### Заключение

Студенты кафедры «Оборудование и технологии прокатки» приобретут навык научного исследования переходного процесса (крутильные колебания), возникающего в МЧЭ рабочей клетки после захвата прокатываемой заготовки рабочими валками, и смогут самостоятельно использовать его для решения задачи реконструкции прокатного стана дуо-160, поставленной перед ними в рамках курсового или дипломного проектирования.

**Список литературы:**

1. Яковлев Р.А. Асимметричное нагружение прокатных станов: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 84 с.
2. Красовский А.Б., Васюков С.А., Мисеюк О.И., Трунин Ю.В. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Электротехника и электроника». – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 25 с.
3. Волченсков В.И. Исследование трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Электротехника и электроника». – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 41 с.

**References:**

1. Yakovlev R.A. Asymmetric loading of rolling mills: a textbook. – Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2001. – 84 p.
2. Krasovsky A.B., Vasyukov S.A., Misyuk O.I., Trunin Yu.V. Research of an asynchronous motor with a short-circuited rotor: methodological guidelines for laboratory work in the discipline "Electrical engineering and electronics". – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. – 25 p.
3. Volchenskov V.I. Investigation of three-phase asynchronous motors with a phase rotor: guidelines for completing homework in the course "Electrical engineering and electronics". – Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2009. – 41 p.