

УДК 621.3

**НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПРОКАТНОГО СТАНА ДУО-160****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Соболев Владимир Афанасьевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: vasobolev48@yandex.ru**Аннотация**

Приведена математическая модель для исследования переходных крутильно-колебательных процессов в механической части электропривода рабочих валков прокатного стана дуо-160. Построена механическая характеристика трехфазного асинхронного электродвигателя 5А225М8У3, приводящего во вращение рабочие валки.

Ключевые слова: электропривод, прокатный стан, электротехника.**SCIENTIFIC RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES IN THE ELECTRIC
DRIVE OF THE DUO-160 ROLLS****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Vladimir A. Sobolev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,
e-mail: vasobolev48@yandex.ru**ABSTRACT**

A mathematical model is presented for the study of transient torsional-oscillatory processes in the mechanical part of the electric drive of the rolling mill working rolls of the Duo-160. The mechanical characteristic of the 5A225M8U3 three-phase asynchronous electric motor, which drives the working rolls, is constructed.

Keywords: electric drive, rolling mill, electrical engineering.

Настоящая статья посвящена вопросу изучения переходных процессов в электроприводе рабочих валков прокатного стана дуо-160, расположенного в лаборатории имени академика А.И. Целикова кафедры МТ-10 «Оборудование и технологии прокатки» на территории МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 1).

Техническая характеристика лабораторного стана дуо 160 (ХПЛ-160)	
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	30 кВт
с. число оборотов	935 об/мин
д. реверсивность	Да
е. регулируемость числа оборотов	Да
2. Редуктор	
а. тип	Цилиндрический с косозуб. зацеплением
б. число ступеней	2
с. общее передаточное число	28.34
3. Шестерённая клеть	Шевронное зацепление, d=160 мм
4. Муфты	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 1. Техническая характеристика стана дуо-160

Длительность переходных процессов в электрической и механической частях электропривода, как правило, составляет доли секунды, но при этом токи и моменты могут многократно превышать установившиеся значения [1].

Объект исследования – механическая часть электропривода (МЧЭ) рабочих валков прокатного стана, которую составляют вращающиеся части электродвигателя, моторная муфта, вращающиеся части редуктора, коренная муфта, вращающиеся части шестеренной клетки и универсальные шпиндели, а также сами рабочие валки (рис. 2).

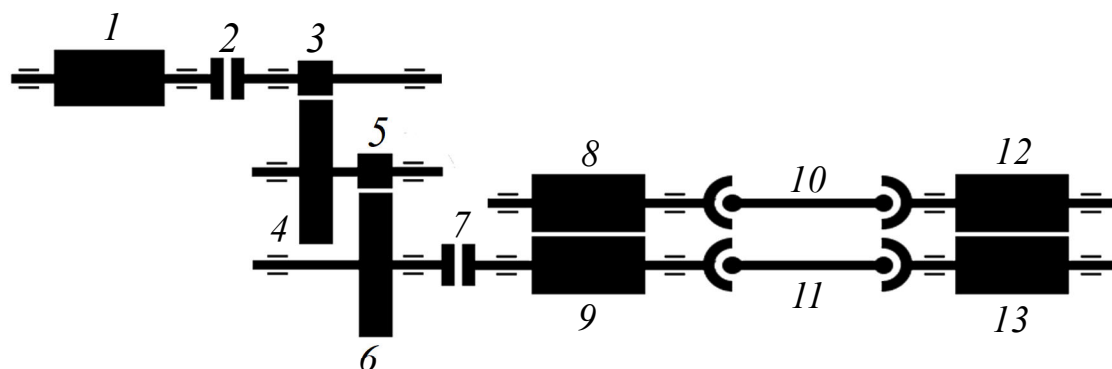


Рисунок 2. Кинематическая схема МЧЭ:

- 1 – ротор электродвигателя;
- 2 – моторная пальцевая муфта;
- 3 – вал-шестерня быстрого хода ступени редуктора;
- 4 – зубчатое колесо быстрого хода ступени редуктора;
- 5 – вал-шестерня медленного хода ступени редуктора;
- 6 – зубчатое колесо медленного хода ступени редуктора;
- 7 – коренная пальцевая муфта;
- 8 – верхний шестеренный валок;
- 9 – нижний шестеренный валок;
- 10 – верхний универсальный шпиндель;
- 11 – нижний универсальный шпиндель;
- 12 – верхний рабочий валок;
- 13 – нижний рабочий валок

Наша основная задача заключается в том, чтобы исследовать на ЭВМ крутильные колебания (переходные процессы, возникающие в МЧЭ) методом математического моделирования. Для решения задачи составлена крутильно-колебательная модель МЧЭ, состоящая из трех массивных абсолютно жестких дисков (A, B, C) и двух связей (AB, AC), представленных в виде невесомых упругодемпфирующих валов, соединяющих эти диски (рис. 3).

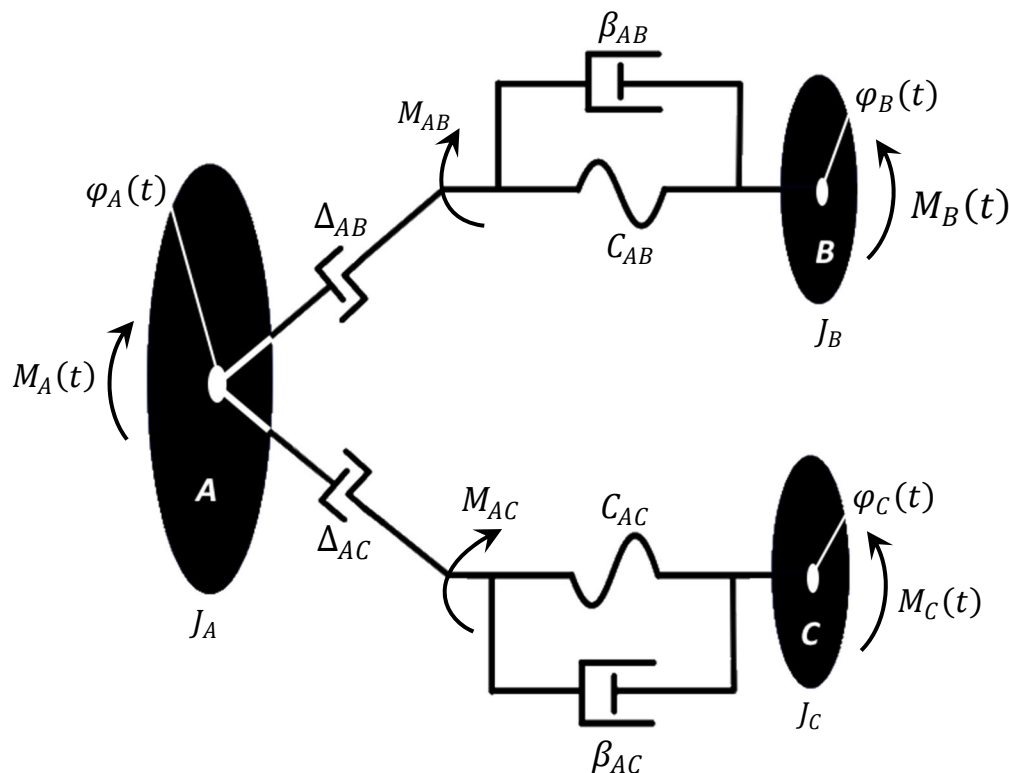


Рисунок 3. Расчетная модель МЧЭ:
 диск А – ротор, муфты, вал-шестерни,
 зубчатые колеса, шестеренные валки;
 диск В – верхний рабочий валок;
 диск С – нижний рабочий валок;
 связь АВ – верхний шпиндель;
 связь АС – нижний шпиндель

Идентифицированы [2] параметры расчетной модели МЧЭ (табл. 1).

Таблица 1. Параметры расчетной модели МЧЭ

Название	Обозначение	Величина	Размерность
Осевой момент инерции диска	J_A	1,25	кг · м ²
	J_B	0,0001	
	J_C	0,0001	
Крутильная жесткость связи	C_{AB}	600	кН · м/рад
	C_{AC}	600	кН · м/рад
Люфт в связи	Δ_{AB}	0,02	рад
	Δ_{AC}	0,02	рад
Параметр демпфирования связи	β_{AB}	0,5	Н · м · с/рад
	β_{AC}	0,5	Н · м · с/рад
	φ_A	$\varphi_A(t)$	рад

Угловая координата диска		φ_B	$\varphi_B(t)$	
		φ_C	$\varphi_C(t)$	
Внешний крутящий момент		M_A	$M_A(t)$	Н · м
		M_B	$M_B(t)$	
		M_C	$M_C(t)$	
Внутренний крутящий момент		M_{AB}	$M_{AB}(t)$	Н · м
		M_{AC}	$M_{AC}(t)$	

Угловые скорости дисков [рад/с]:

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

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

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

Угловые ускорения дисков [рад/с²]:

$$\varepsilon_A(t) = d^2\varphi_A(t)/dt^2$$

$$\varepsilon_B(t) = d^2\varphi_B(t)/dt^2$$

$$\varepsilon_C(t) = d^2\varphi_C(t)/dt^2$$

Рабочие валки (технологический инструмент) прокатного стана дуо-160 приводит во вращение электродвигатель типа 5A225M8Y3 (рис. 4).



Рисунок 4. Моторный участок привода рабочей клетки

Расшифровка маркировки 5A225M8Y3 (рис. 5):

5 – номер унифицированной серии;

- А – асинхронный с короткозамкнутым ротором;
 225 – расстояние от оси вращения до плоскости крепления [мм];
 М – условная длина сердечника статора;
 8 – число полюсов;
 У – исполнение для района с умеренным климатом;
 3 – температура окружающей среды от -40 до $+40$ °С.



Рисунок 5. Шильдик электродвигателя

Номинальная механическая мощность электродвигателя

$$P_{2H} = 30 \text{ кВт}.$$

Номинальная частота вращения вала электродвигателя

$$n_H = 735 \text{ об/мин}.$$

Номинальный крутящий момент на валу электродвигателя

$$M_H = \frac{9,55 \cdot P_{2H}}{n_H} = \frac{9,55 \cdot 30\,000}{735} \approx 390 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кратность максимального момента

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

Кратность пускового момента

$$\frac{M_{пуск}}{M_H} = 2,1.$$

Частота питающей сети

$$f_1 = 50 \text{ Гц}.$$

Число пар полюсов электродвигателя

$$p = 4.$$

Максимальный (критический) момент

$$M_{max} = 2,2 M_H = 2,2 \cdot 390 = 858 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент

$$M_{пуск} = 2,1 M_H = 2,1 \cdot 390 = 819 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Частота вращения магнитного поля электродвигателя

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Номинальное скольжение составляет 2% :

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{750 - 735}{750} = 0.02 .$$

Критическое скольжение составляет примерно 8% :

$$s_{кр} = s_H \left(\frac{M_{max}}{M_H} + \sqrt{\left(\frac{M_{max}}{M_H}\right)^2 - 1} \right) = 0.02 \cdot \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) \approx 0,083 .$$

Построена естественная механическая характеристика электродвигателя типа 5A225M8У3 (рис. 4) по рекомендациям [3]:

$$M(s) = \frac{2 M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = \frac{2 \cdot 858}{\frac{s}{0,083} + \frac{0,083}{s}}$$

$$n(s) = n_0(1 - s) = 750 \cdot (1 - s).$$

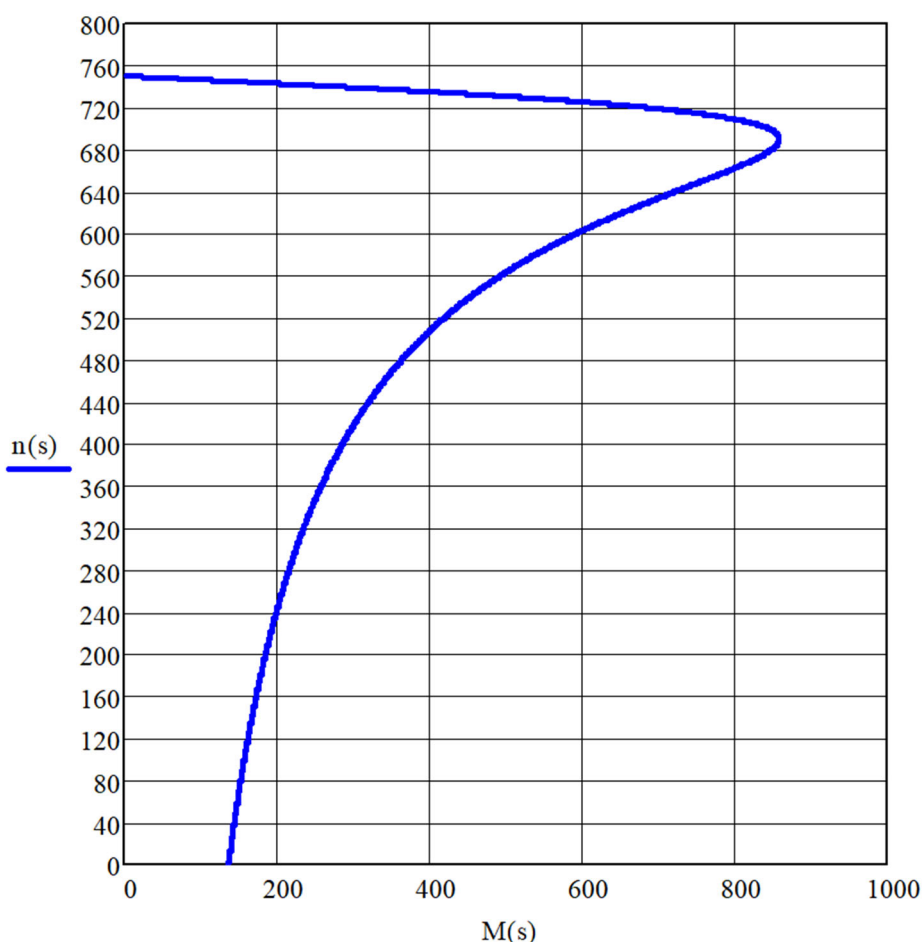


Рисунок 4. Механическая характеристика электродвигателя

Для случая симметричной прокатки нами рассмотрены три варианта [4] построения нагрузочных диаграмм (рис. 4).

Первый вариант – линейная функция времени:

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

где

$M_{уст}$ [Н · м] – установившийся момент прокатки (на одном рабочем валке);

$T_{\text{зах}}$ [с] – продолжительность захвата заготовки рабочими валками;
 t [с] – переменная времени.

Второй вариант – экспоненциальная функция времени:

$$M_B(t) = M_C(t) = M_{\text{уст}} (1 - e^{-t/A}) \quad (2)$$

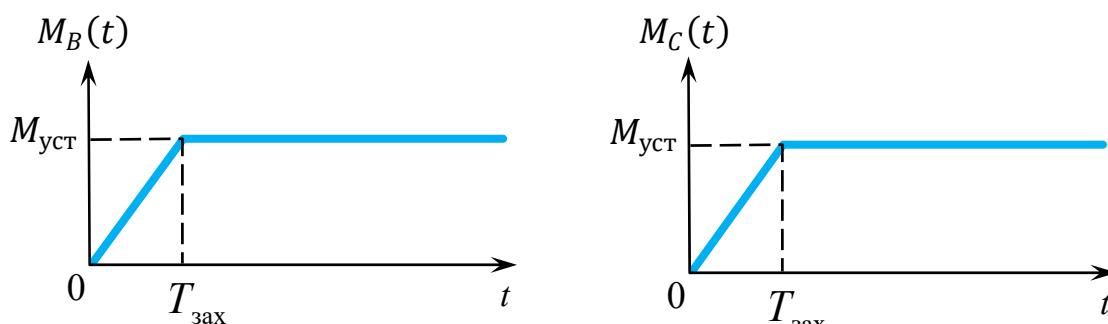
где $A = (0,4 \dots 0,5) T_{\text{зах}}$ – показатель нарастания экспоненты;

Третий вариант – синусоидальная функция времени:

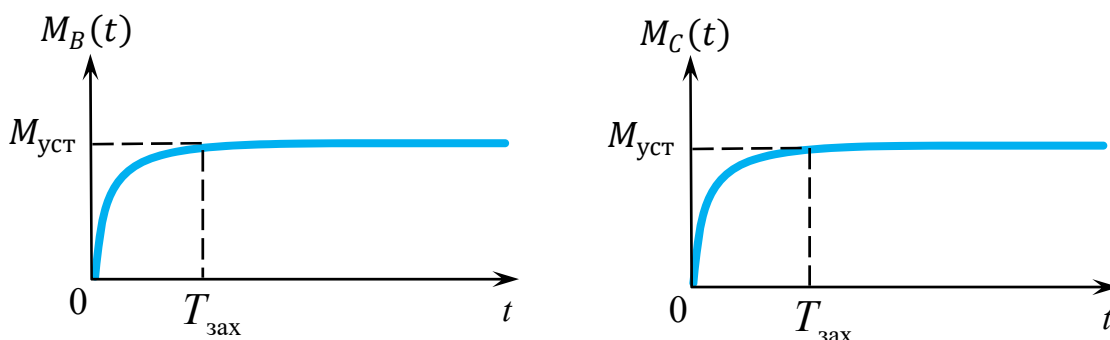
$$M_B(t) = M_C(t) = \begin{cases} M_{\text{уст}} \sin \omega t & \text{при } t < T_{\text{зах}} \\ M_{\text{уст}} & \text{при } t \geq T_{\text{зах}} \end{cases} \quad (3)$$

где ω [рад/с] – угловая скорость рабочих валков;

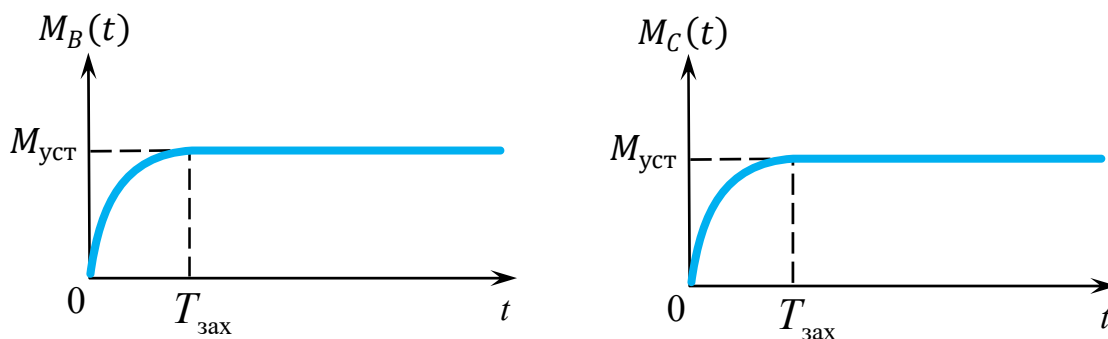
$$T_{\text{зах}} = \frac{\pi}{2\omega}.$$



1 вариант



2 вариант



3 вариант

Рисунок 4. Нагрузочные диаграммы МЧЭ

Для физической модели МЧЭ построены характеристики сил упругости связей АВ и АС (рис. 5):

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

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

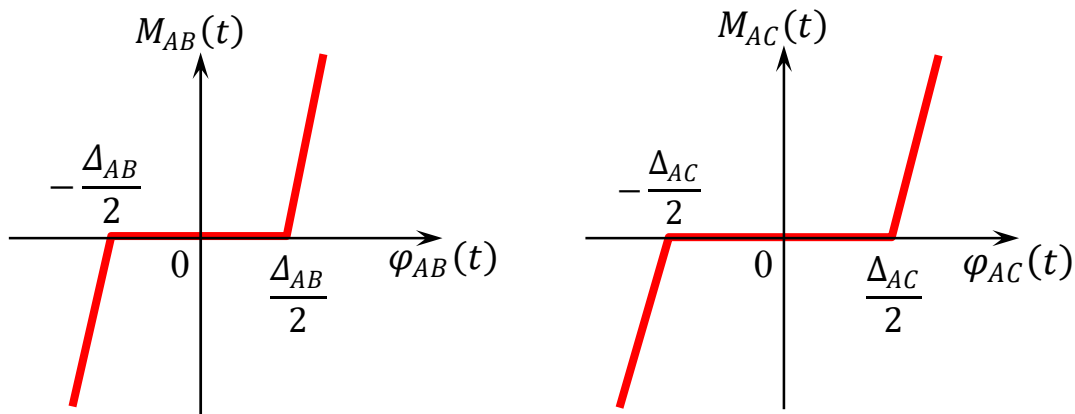


Рисунок 5. Характеристики сил упругости МЧЭ

Уравнения крутильных колебаний МЧЭ имеют вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_A(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} \\ \varepsilon_B(t) = \frac{M_{AB}(t) - M_B(t)}{J_B} \\ \varepsilon_C(t) = \frac{M_{AC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{cases} \quad (4)$$

или

$$\begin{cases} \varepsilon_{AB}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_B(t)}{J_B} \\ \varepsilon_{AC}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{cases} \quad (5)$$

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:

$$M_{AB}(t) = \begin{cases} C_{AB} \left(\varphi_{AB}(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AB}(t)) \right) + \\ + \beta_{AB} \omega_{AB}(t), & \text{при } |\varphi_{AB}(t)| \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{AB}(t)| < \frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{AB}(t) &= \varphi_A(t) - \varphi_B(t) \\ \omega_{AB}(t) &= \omega_A(t) - \omega_B(t) \end{aligned}$$

Упругодемпфирующий момент вала АС с учетом люфта:

$$M_{AC}(t) = \begin{cases} C_{AC} \left(\varphi_{AC}(t) - \frac{\Delta_{AC}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AC}(t)) \right) + \\ + \beta_{AC} \omega_{AC}(t), & \text{при } |\varphi_{AC}(t)| \geq \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{AC}(t)| < \frac{\Delta_{AC}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{AC}(t) &= \varphi_A(t) - \varphi_C(t) \\ \omega_{AC}(t) &= \omega_A(t) - \omega_C(t) \end{aligned}$$

Начальные условия – нулевые:

$$\begin{aligned} \varphi_{AB}(0) &= \varphi_{AC}(0) = 0 \\ \omega_{AB}(0) &= \omega_{AC}(0) = 0 \\ \varepsilon_{AB}(0) &= \varepsilon_{AC}(0) = 0 \\ M_{AB}(0) &= M_{AC}(0) = 0 \end{aligned}$$

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

В результате решения уравнений (7) или (8) с учетом (9) и (10) на ЭВМ будут получены графики упругодемпфирующих моментов (рис. 6).

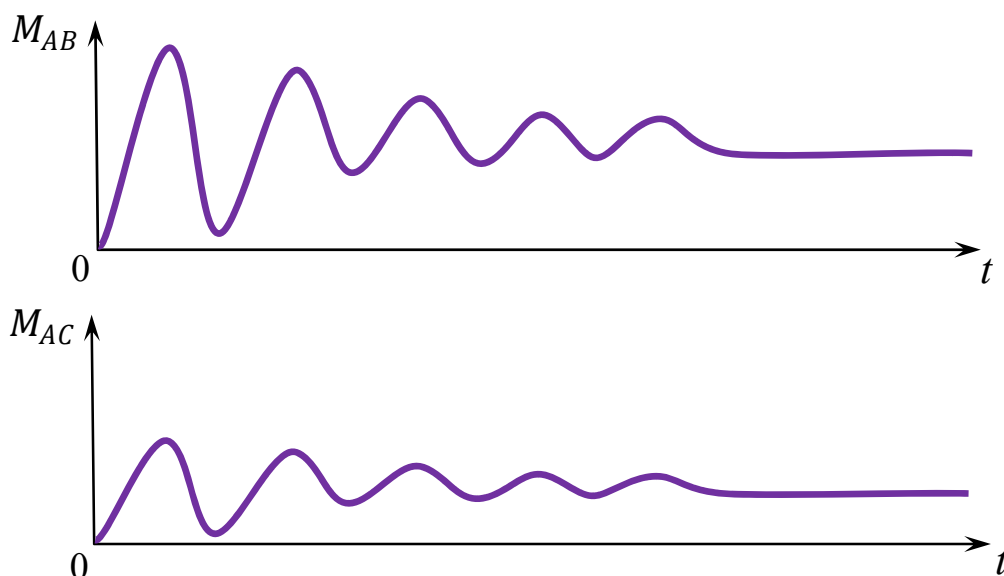


Рисунок 9. Переходный процесс в МЧЭ

Заключение

Материалы и результаты, приведенные нами в настоящей статье, могут вызвать интерес у студентов кафедры «Оборудование и технологии прокатки» в процессе выполнения ими научно-исследовательской работы (НИРС) и подготовки к выступлению с

докладом на кафедре «Электротехника и промышленная электроника» в рамках конференции «Студенческая научная весна».

Список литературы:

1. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учебное пособие для вузов, 3-е издание. — Москва: Издательство МЭИ, 2007. — 224 с.
2. Мальцев А.А. Динамика и прочность электропривода клетки дуо-160: методические указания к НИРС. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 44 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для бакалавров, 2-е издание. — Москва: Издательство Юрайт, 2012. — 675 с.
4. Смирнов В.В., Яковлев Р.А. Механика приводов прокатных станов. — Москва: Металлургия, 1977. — 216 с.

References:

1. Pyinsky N.F. Fundamentals of electric drive: textbook for universities, 3rd edition. — Moscow: MEI publishing house, 2007. — 224 p.
2. Maltsev A.A. Dynamics and strength of the duo-160 hoist electric drive: guidelines for research and innovation. Moscow: BMSTU, 2016. — 44 p.
3. Kopilov I.P. Electric machines: textbook for bachelors, 2nd edition. — Moscow: Yurayt publishing house, 2012. — 675 p.
4. Smirnov V.V., Yakovlev R.A. Mechanics of rolling mill drives. — Moscow: Metallurgy, 1977. — 216 p.