

УДК 621.771

**НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ КЛЕТИ №5 НШС 2000 НЛМК****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Построена и верифицирована компьютерная модель для теоретического исследования динамических нагрузок в электроприводе рабочих валков клетки №5 непрерывного широкополосового стана (НШС) горячей прокатки 2000 Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК).

Ключевые слова: электропривод, крутильные колебания, металлургия.**CHANNELS SCIENTIFIC STUDY OF TORSIONAL VIBRATIONS IN THE
ELECTRIC DRIVE OF THE "НШС 2000 НЛМК» CAGE NO. 5****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 departments;
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

A computer model was built and verified for the theoretical study of dynamic loads in the electric drive of the working rolls of the stand No. 5 of the continuous broadband hot rolling mill 2000 of the Novolipetsk Metallurgical Combine.

Keywords: electric drive, torsional vibrations, metallurgy.

Объект исследования — электропривод рабочих валков черновой клетки №5 НШС 2000 НЛМК (рис. 1).

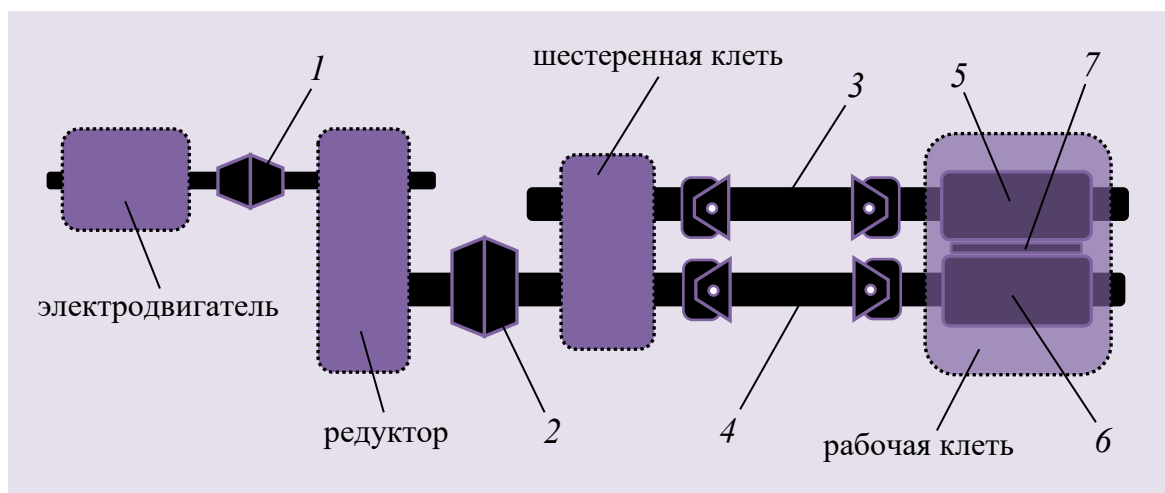


Рисунок 1. Кинематическая схема электропривода:

- 1 – муфта моторная;
- 2 – муфта коренная;
- 3, 4 – шпиндели;
- 5, 6 – рабочие валки;
- 7 – полоса (заготовка)

В процессе горячей прокатки – деформации нагретой заготовки между двумя рабочими валками [1] – в электроприводе рабочих валков клетки №5 возникали значительные динамические нагрузки, неоднократно разрушались зубья вала-шестерни редуктора по данным источника [2].

Цель научного исследования – по заданной расчетной схеме (рис. 2) построить в программной среде MathCAD крутильно-колебательную модель электропривода и проверить ее на адекватность.

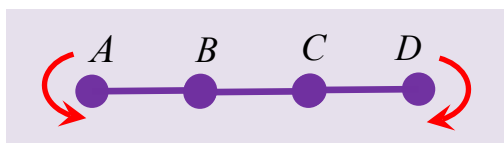


Рисунок 2. Расчетная схема электропривода:

A, B, C, D – массы (массивные диски)

Исходные материалы для исследования (табл. 1) взяты из источника [2].

Таблица 1. Инерционно-упругие параметры модели электропривода

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Осевые моменты инерции			
Масса А	J_A	35 000	кг · м ²
Масса В	J_B	22 000	кг · м ²
Масса С	J_C	205 000	кг · м ²
Масса D	J_D	1 450 000	кг · м ²
Крутильные жесткости			
Связь АВ	C_{AB}	$250 \cdot 10^6$	Н · м/рад
Связь ВС	C_{BC}	$1\,430 \cdot 10^6$	Н · м/рад
Связь CD	C_{CD}	$2\,350 \cdot 10^6$	Н · м/рад

Достичь намеченной цели исследования позволяет метод формализации, суть которого состоит в том, что динамические процессы в электроприводе рабочих валков клети №5 НШС 2000 НЛМК описываются математическими формулами:

$$\begin{aligned} J_A \ddot{\varphi}_A + M_{AB} &= M_A; \\ J_B \ddot{\varphi}_B - M_{AB} + M_{BC} &= 0; \\ J_C \ddot{\varphi}_C - M_{BC} + M_{CD} &= 0; \\ J_D \ddot{\varphi}_D - M_{CD} &= -M_D, \end{aligned}$$

где M_{AB}, M_{BC}, M_{CD} – упругие крутящие моменты;

$$\begin{aligned} M_{AB} &= C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B) + \beta_{AB}(\dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_B); \\ M_{BC} &= C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C) + \beta_{BC}(\dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_C); \\ M_{CD} &= C_{CD}(\varphi_C - \varphi_D) + \beta_{CD}(\dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_D). \end{aligned}$$

Моменты M_A и M_D – экспоненциальные функции времени (рис. 3):

$$M_A = M_D = M_{\Pi} \left[1 - e^{-\frac{t}{0,45 T_{\text{зах}}}} \right],$$

где

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

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

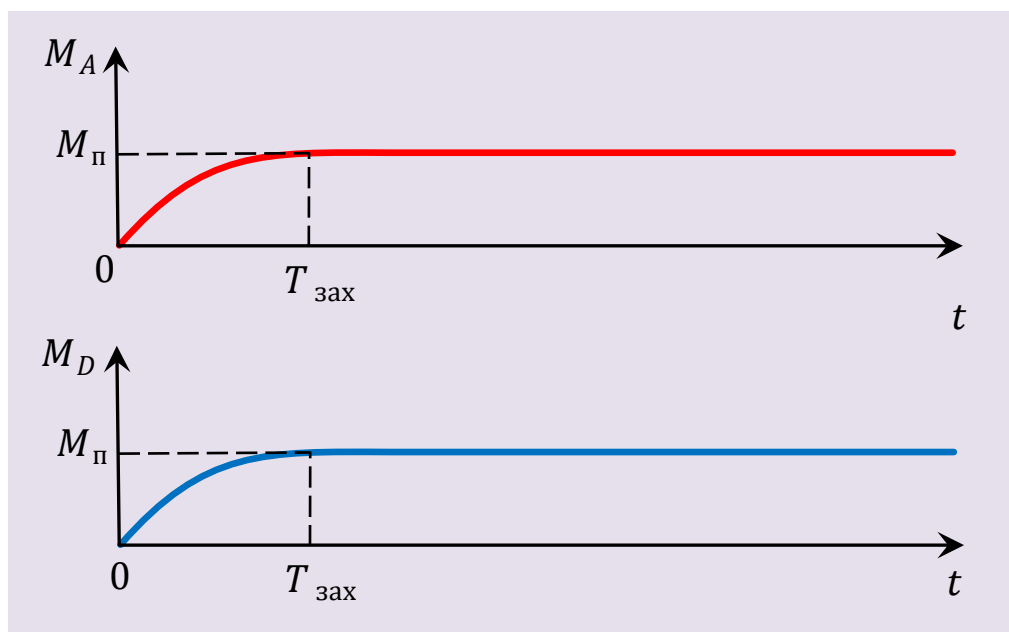


Рисунок 3. Зависимости моментов M_A и M_D от времени t

Задача математического моделирования – решить систему, состоящую из четырех дифференциальных уравнений второго порядка, при нулевых начальных условиях: найти угловые координаты $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$ [рад] и, зная их, вычислить упругие крутящие моменты M_{AB}, M_{BC}, M_{CD} [Н·м].

Компьютерная крутильно-колебательная модель, построенная мною в программной среде MathCAD, имеет такой вид:

$$J_A := 35000$$

$$J_B := 22000$$

$$J_C := 205000$$

$$J_D := 1450000$$

$$C_{AB} := 250 \cdot 10^6$$

$$C_{BC} := 1430 \cdot 10^6$$

$$C_{CD} := 2350 \cdot 10^6$$

$$\beta_{AB} := 0 \cdot 10^3$$

$$\beta_{BC} := 0 \cdot 10^3$$

$$\beta_{CD} := 0 \cdot 10^3$$

$$M_{II} := 0 \cdot 10^3$$

$$T_{\text{зах}} := 0.1$$

Given

$$\varphi_A(0) = 0$$

$$\varphi_B(0) = 0$$

$$\varphi_C(0) = 0$$

$$\varphi_D(0) = 0$$

$$\varphi_{A'}(0) = 0$$

$$\varphi_{B'}(0) = 0$$

$$\varphi_{C'}(0) = 0$$

$$\varphi_{D'}(0) = 0$$

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

$$M_{BC}(0) = 0$$

$$M_{CD}(0) = 0$$

$$M_{AB}(t) = C_{AB} \cdot (\varphi_A(t) - \varphi_B(t)) + \beta_{AB} \cdot (\varphi_A'(t) - \varphi_B'(t))$$

$$M_{BC}(t) = C_{BC} \cdot (\varphi_B(t) - \varphi_C(t)) + \beta_{BC} \cdot (\varphi_B'(t) - \varphi_C'(t))$$

$$M_{CD}(t) = C_{CD} \cdot (\varphi_C(t) - \varphi_D(t)) + \beta_{CD} \cdot (\varphi_C'(t) - \varphi_D'(t))$$

$$J_A \cdot \varphi_A''(t) + M_{AB}(t) = M_{II} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0.45 \cdot T_{\text{зах}}}\right) \right)$$

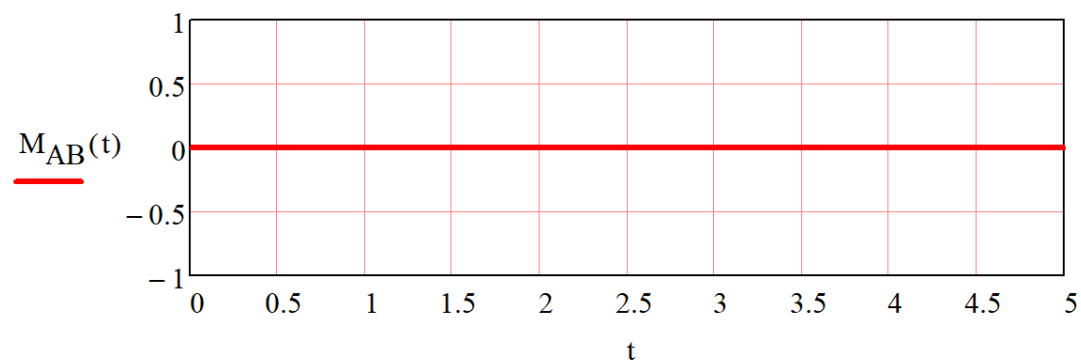
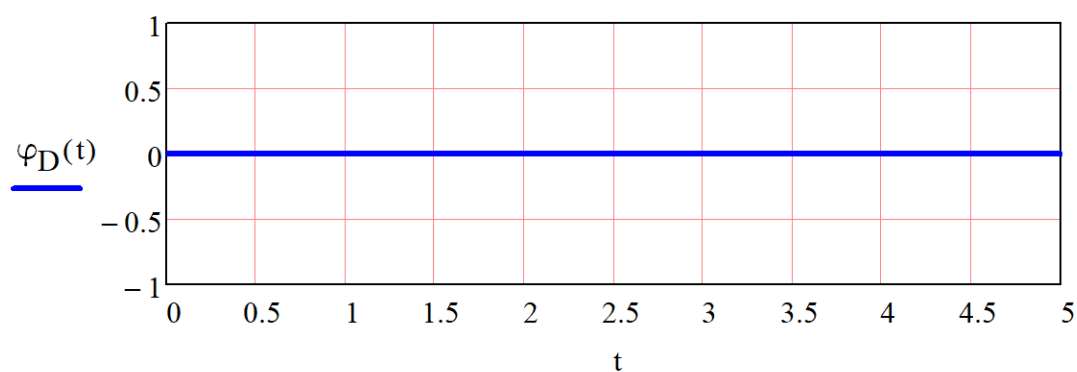
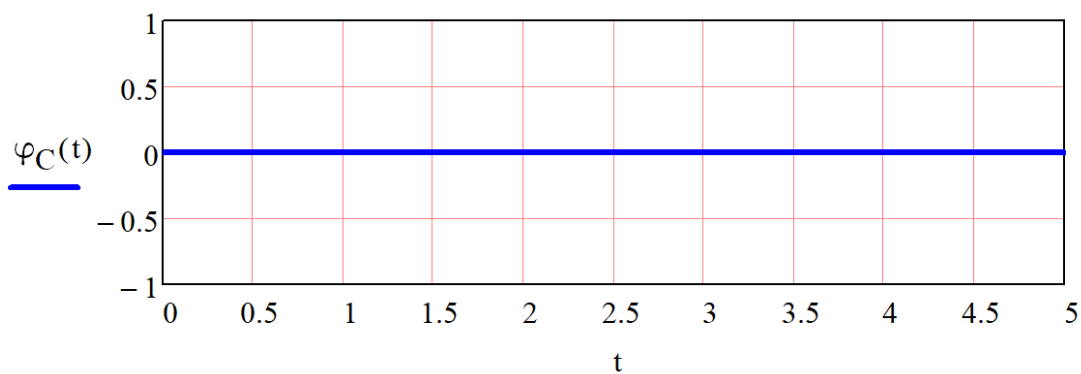
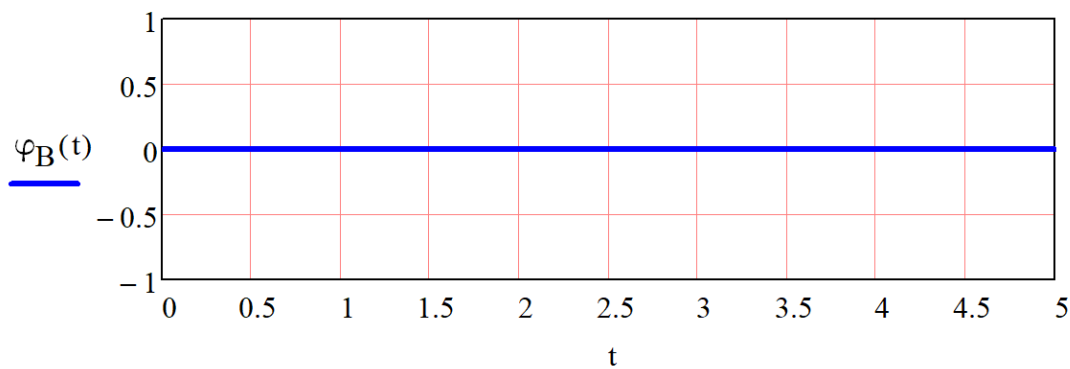
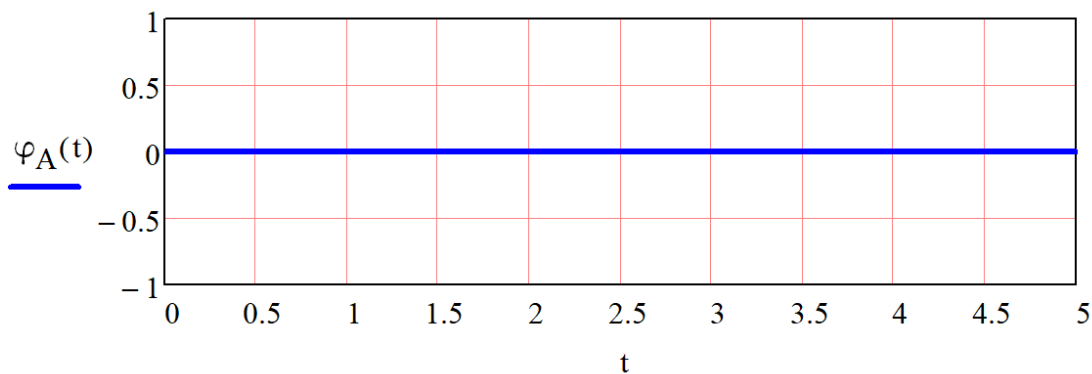
$$J_B \cdot \varphi_B''(t) - M_{AB}(t) + M_{BC}(t) = 0$$

$$J_C \cdot \varphi_C''(t) - M_{BC}(t) + M_{CD}(t) = 0$$

$$J_D \cdot \varphi_D''(t) - M_{CD}(t) = -M_{II} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0.45 \cdot T_{\text{зах}}}\right) \right)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_A \\ \varphi_B \\ \varphi_C \\ \varphi_D \\ M_{AB} \\ M_{BC} \\ M_{CD} \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} \varphi_A \\ \varphi_B \\ \varphi_C \\ \varphi_D \\ M_{AB} \\ M_{BC} \\ M_{CD} \end{pmatrix}, t, 5 \right]$$

Результаты исследования – компьютерные графики изменения во времени t [с] угловых координат $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$ [рад] и упругих крутящих моментов M_{AB}, M_{BC}, M_{CD} [Н·м], построенные в программной среде MathCAD (рис. 4, 5, 6).



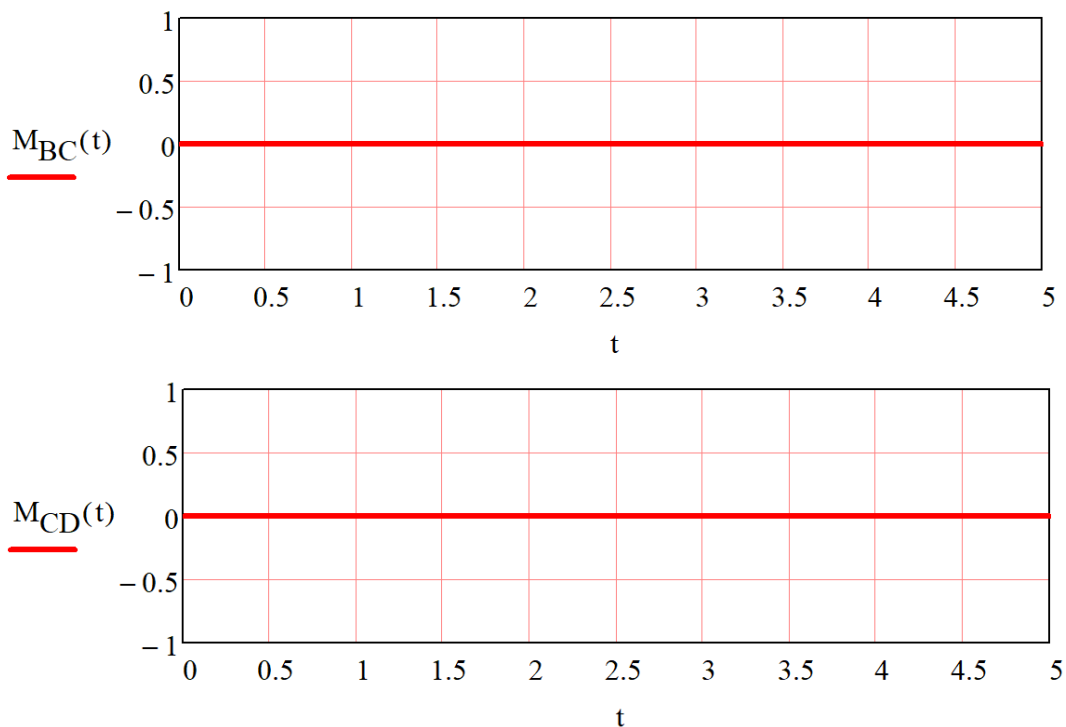
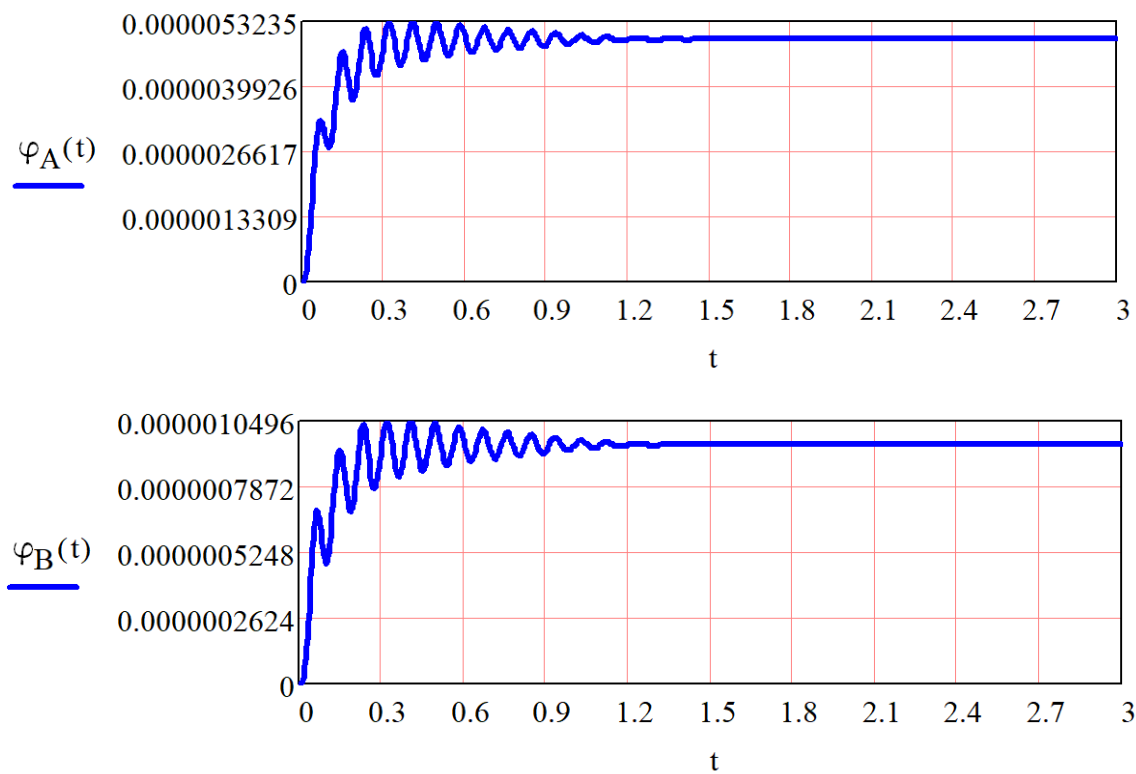


Рисунок 4. Результаты первого опыта:

$M_{п} = 0$ – установившийся момент прокатки [Н · м] ;

$T_{зах} = 0,1$ – продолжительность захвата заготовки [с] ;

$\beta_{AB} = \beta_{BC} = \beta_{CD} = 0$ – параметры демпфирования [Н · м · с/рад]



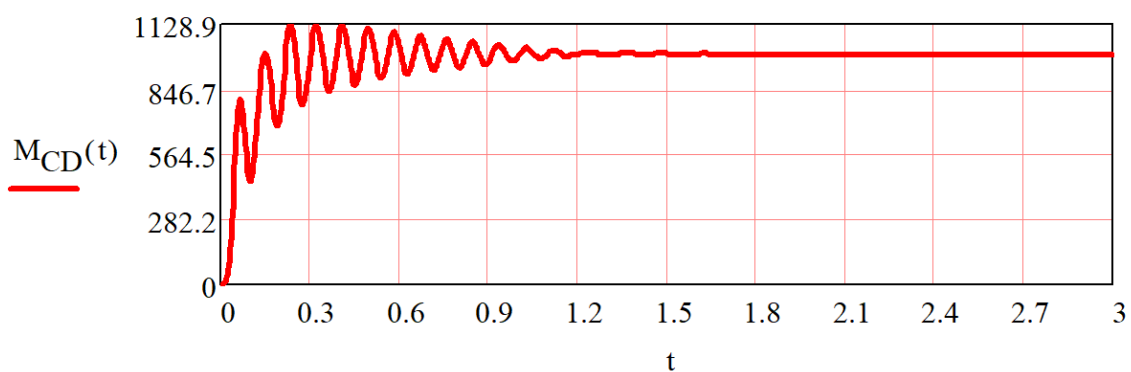
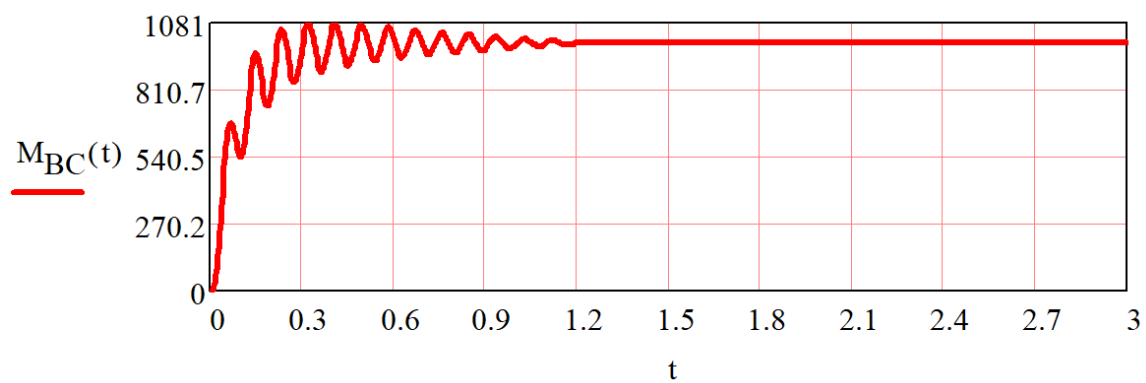
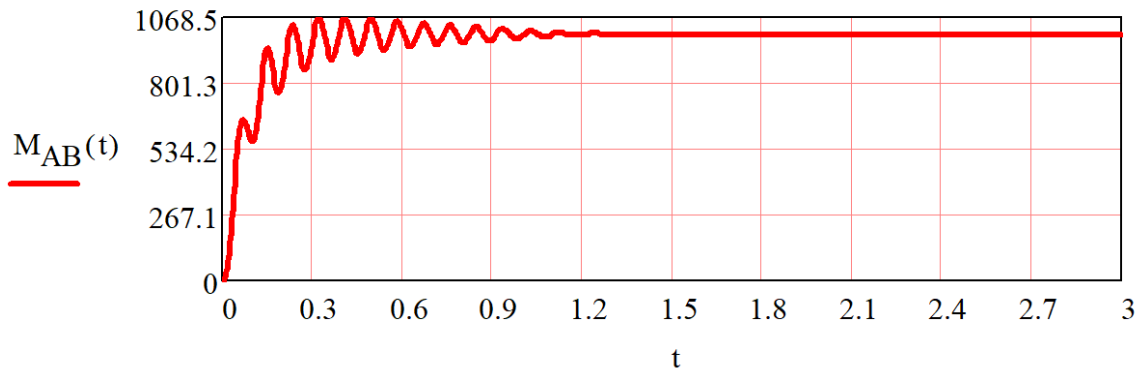
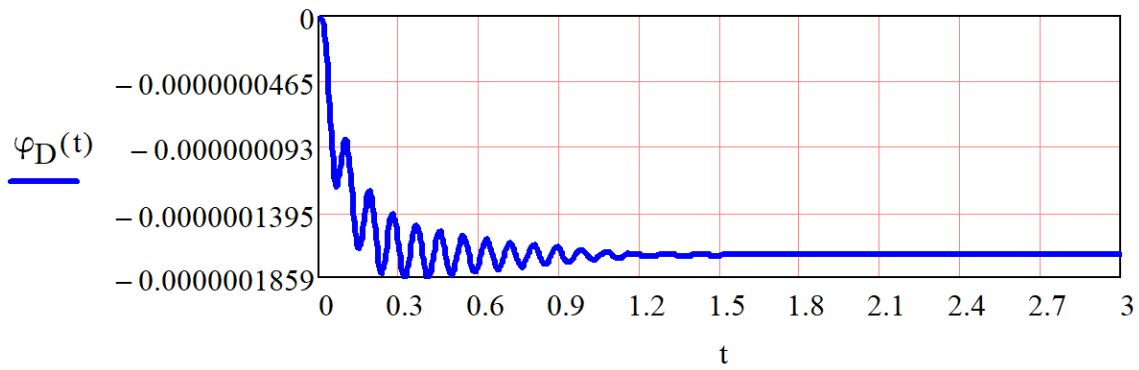
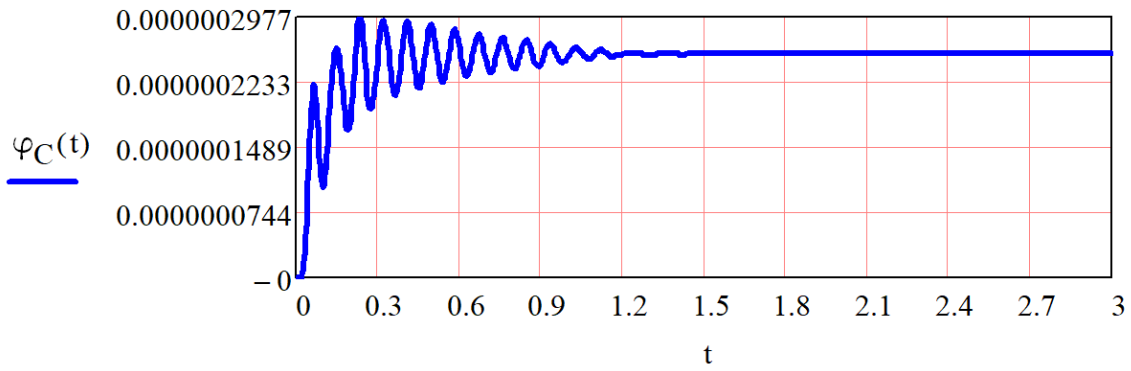
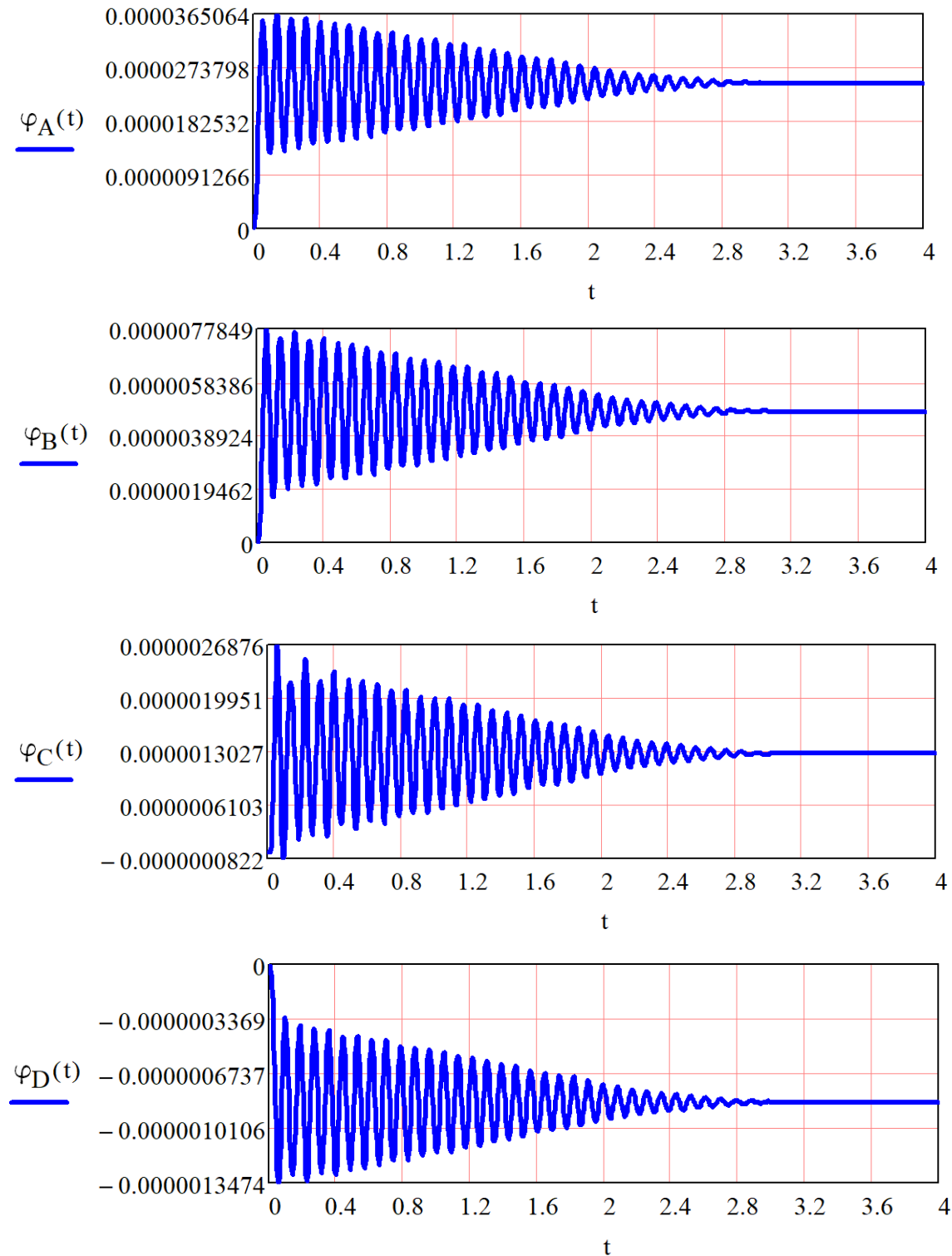


Рисунок 5. Результаты второго опыта:

$M_{\text{п}} = 1\,000$ – установившийся момент прокатки [Н · м] ;

$T_{\text{зах}} = 0,2$ – продолжительность захвата заготовки [с] ;

$\beta_{AB} = \beta_{BC} = \beta_{CD} = 0$ – параметры демпфирования [Н · м · с/рад]



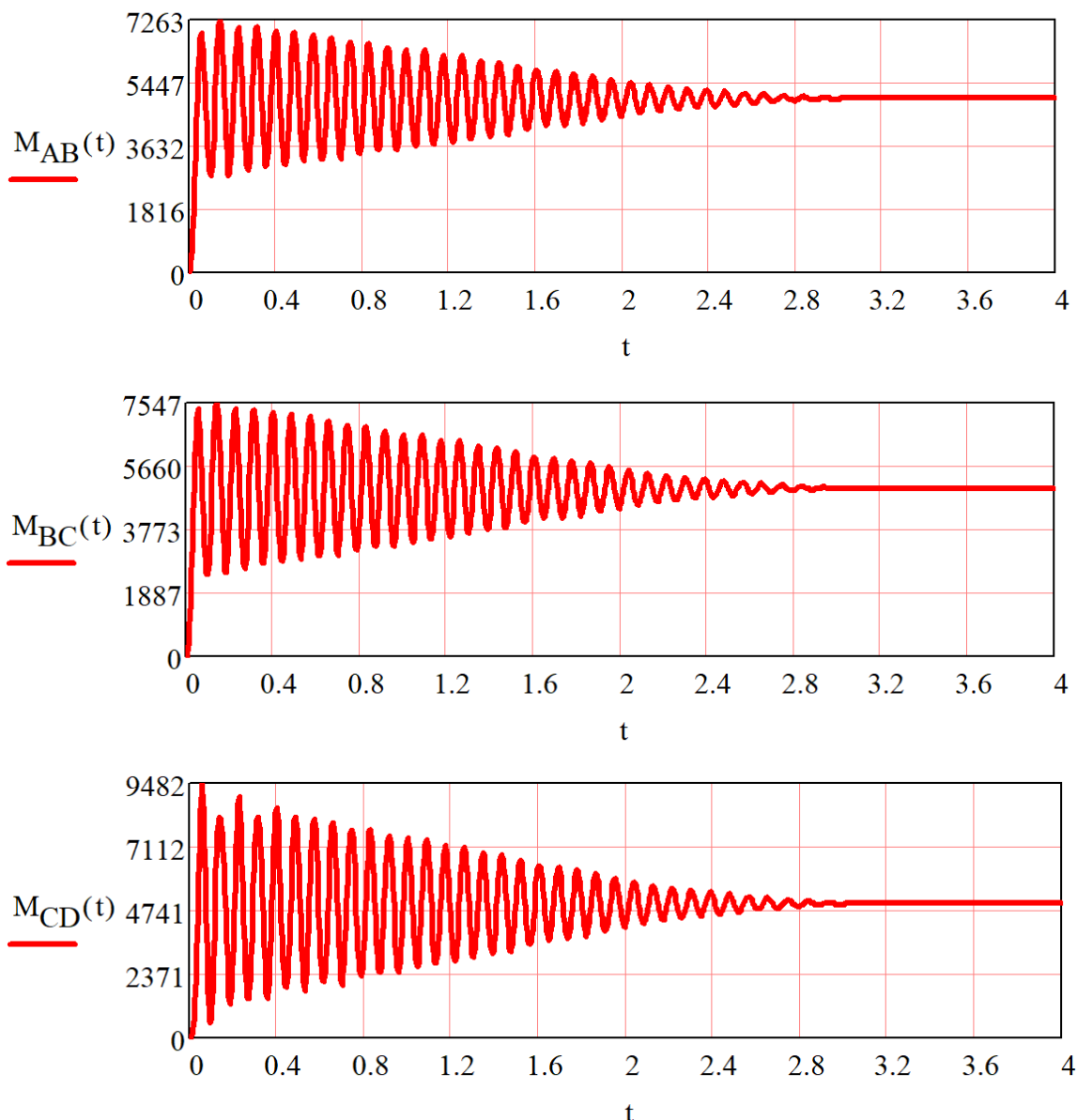


Рисунок 6. Результаты третьего опыта:

$$M_{\Pi} = 5\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м]} ;$$

$$T_{\text{зах}} = 0,05 \text{ [с]} ;$$

$$\beta_{AB} = 1000 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад]} ;$$

$$\beta_{BC} = 2000 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад]} ;$$

$$\beta_{CD} = 3000 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад]} ;$$

Заключение: компьютерная модель успешно прошла проверку на адекватность (варьировались параметры $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}, T_{\text{зах}}, M_{\Pi}$) и пригодна для теоретического исследования динамических нагрузок (для определения коэффициентов динамичности K_{AB}, K_{BC}, K_{BD} , частот крутильных колебаний $\nu_{AB}, \nu_{BC}, \nu_{BD}$ [Гц] и др.) в электроприводе рабочих валков клетки №5 НШС 2000 НЛМК.

Список литературы:

1. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. Том. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для вузов. – Москва: Металлургия, 1988. – 680 с.

2. Яковлев Р.А. Ограничение динамических нагрузок в металлургических машинах: учебное пособие по курсу «Основы динамики металлургических машин» / под ред. А.Г. Колесникова. – М.: Изд-во МГТУ, 1990. – 36 с.

References:

1. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. et al. Machines and aggregates of metallurgical plants. Vol. 3. Machines and units for the production and finishing of rolled products: textbook for universities. – Moscow: Metallurgy, 1988. – 680 p.
2. Yakovlev R.A. Limitation of dynamic loads in metallurgical machines: a textbook for the course "Fundamentals of dynamics of metallurgical machines" / edited by A.G. Kolesnikov. – M.: Publishing House of MSTU, 1990. – 36 p.