



УДК 621.771

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КРУТИЛЬНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА СРЕДСТВАМИ SIMULINK

Андрей Анатольевич Мальцев

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

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

Аннотация

В программной среде Simulink построена крутильно-колебательная модель электропривода прокатного стана и исследован переходный процесс, вызванный ударом при захвате заготовки рабочими валками.

Ключевые слова: Simulink, прокатный стан, крутильные колебания.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE TORSIONAL- OSCILLATORY MODEL OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE ROLLING MILL BY MEANS OF SIMULINK

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

In the Simulink software environment, a torsional-oscillatory model of the electric drive of a rolling mill is constructed and the transient process caused by a shock when the workpiece is captured by working rolls is investigated.

Keywords: Simulink, rolling mill, torsional vibrations.

Введение

В качестве объекта исследования выступает математическая 4-массовая крутильно-колебательная модель электропривода рабочих валков прокатного стана [1, 2], имеющая разветвленную структуру (рис. 1).

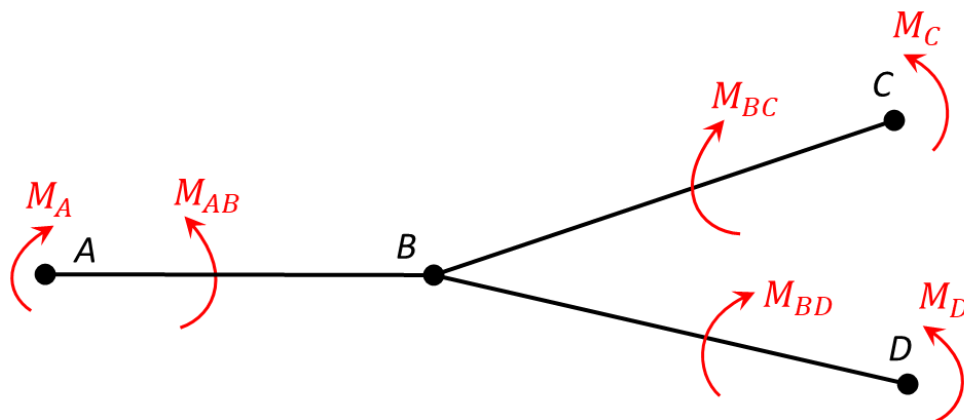


Рисунок 1. Расчетная схема электропривода:
A, B, C, D – крутильно-колеблющиеся массы;
AB, BC, BD – невесомые упругие связи

Математическая модель построена на основании уравнений Лагранжа 2 рода [3] и представляет собой систему из четырех дифференциальных уравнений, описывающих крутильно-колебательное движение масс:

$$\begin{aligned} J_A \varepsilon_A(t) + M_{AB}(t) &= M_A; \\ J_B \varepsilon_B(t) - M_{AB}(t) + M_{BC}(t) + M_{BD}(t) &= 0; \\ J_C \varepsilon_C(t) - M_{BC}(t) &= -M_C; \\ J_D \varepsilon_D(t) - M_{BD}(t) &= -M_D. \end{aligned} \quad (1)$$

Упругие крутящие моменты связей:

$$\begin{aligned} M_{AB}(t) &= C_{AB}[\varphi_A(t) - \varphi_B(t)] + \beta_{AB}[\omega_A(t) - \omega_B(t)]; \\ M_{BC}(t) &= C_{BC}[\varphi_B(t) - \varphi_C(t)] + \beta_{BC}[\omega_B(t) - \omega_C(t)]; \\ M_{BD}(t) &= C_{BD}[\varphi_B(t) - \varphi_D(t)] + \beta_{BD}[\omega_B(t) - \omega_D(t)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Угловые скорости и ускорения крутильно-колеблющихся масс:

$$\begin{aligned} \omega_A(t) &= d\varphi_A(t)/dt; & \varepsilon_A(t) &= d\omega_A(t)/dt; \\ \omega_B(t) &= d\varphi_B(t)/dt; & \varepsilon_B(t) &= d\omega_B(t)/dt; \\ \omega_C(t) &= d\varphi_C(t)/dt; & \varepsilon_C(t) &= d\omega_C(t)/dt; \\ \omega_D(t) &= d\varphi_D(t)/dt; & \varepsilon_D(t) &= d\omega_D(t)/dt; \end{aligned} \quad (3)$$

Начальные условия:

$$\varphi_A(0) = \varphi_B(0) = \varphi_C(0) = \varphi_D(0) = 0; \quad (4)$$

$$\omega_A(0) = \omega_B(0) = \omega_C(0) = \omega_D(0) = 0; \quad (5)$$

$$\varepsilon_A(0) = \varepsilon_B(0) = \varepsilon_C(0) = \varepsilon_D(0) = 0; \quad (6)$$

$$M_{AB}(0) = M_{BC}(0) = M_{BD}(0) = 0. \quad (7)$$

Моменты инерции крутильно-колеблющихся масс:

$$J_A = 20 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_B = 30 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_C = 10 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_D = 10 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Крутильные жесткости связей и демпферы крутильных колебаний:

$$C_{AB} = 500 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}; \quad \beta_{AB} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м};$$

$$C_{BC} = 400 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}; \quad \beta_{BC} = 70 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м};$$

$$C_{BD} = 300 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}; \quad \beta_{BD} = 80 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м}.$$

Внешние моменты электродвигателя и прокатки на рабочих валках:

$$M_A = 1000 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_C = 500 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_D = 500 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Цель исследования

Целью исследования является изучение связей в системе заготовка — технологический инструмент (рабочие валки) — машина (прокатный стан).

В качестве предмета исследования взят переходный процесс (крутильные колебания) в электроприводе, вызванный ударом при захвате прокатываемой заготовки рабочими валками.

Задача исследования заключается в построении графиков изменения во времени t угловых координат $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$, скоростей $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ и ускорений $\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C, \varepsilon_D$ крутильно-колеблющихся масс, а также графиков упругих крутящих моментов связей $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{BD}(t)$, для дальнейшего поиска путей оптимизации параметров математической модели.

Материалы и методы исследования

Для оригинального исследования объекта методом имитационного моделирования математическая модель (1) с учетом (2) – (7) приведена к виду (8) и представлена в виде функциональной блок-схемы (рис. 2).

$$\begin{aligned} \varepsilon_A &= \frac{1\,000\,000 - M_{AB}}{20\,000}; \\ \varepsilon_B &= \frac{M_{AB} - M_{BC} - M_{BD}}{30\,000}; \\ \varepsilon_C &= \frac{M_{BC} - 500\,000}{10\,000}; \\ \varepsilon_D &= \frac{M_{BD} - M_D}{10\,000}. \end{aligned} \quad (8)$$

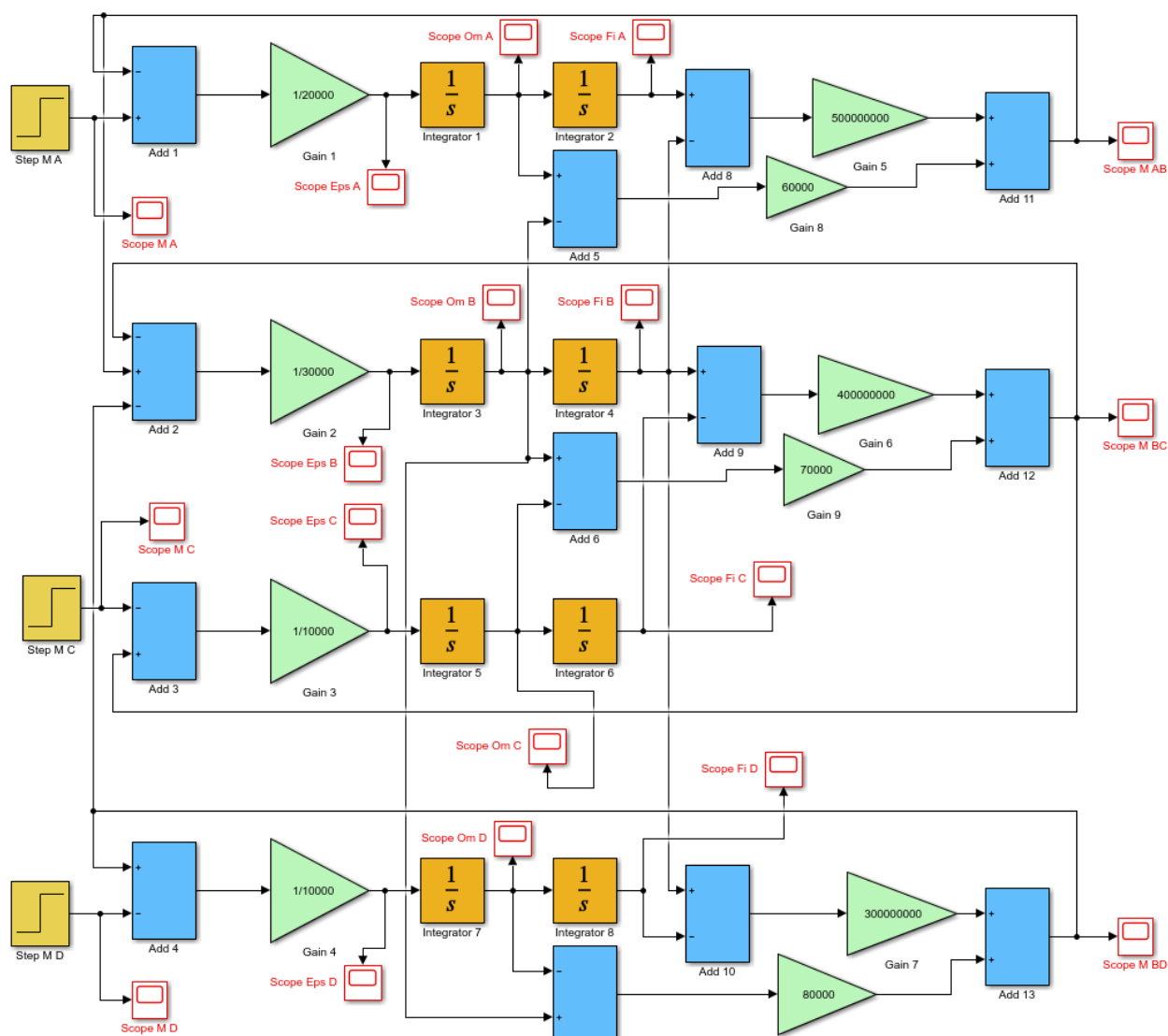


Рисунок 2. Simulink-модель электропривода:

- Step M A – блок ступенчатого внешнего воздействия на величину M_A ;
 Step M C – блок ступенчатого внешнего воздействия на величину M_C ;
 Step M D – блок ступенчатого внешнего воздействия на величину M_D ;
 Scope M A – положение осциллографа для измерения сигнала M_A ;
 Scope M C – положение осциллографа для измерения сигнала M_C ;
 Scope M D – положение осциллографа для измерения сигнала M_D ;
 Scope Eps A – положение осциллографа для измерения сигнала ε_A ;
 Scope Eps B – положение осциллографа для измерения сигнала ε_B ;
 Scope Eps C – положение осциллографа для измерения сигнала ε_C ;
 Scope Eps D – положение осциллографа для измерения сигнала ε_D ;
 Scope Om A – положение осциллографа для измерения сигнала ω_A ;
 Scope Om B – положение осциллографа для измерения сигнала ω_B ;
 Scope Om C – положение осциллографа для измерения сигнала ω_C ;
 Scope Om D – положение осциллографа для измерения сигнала ω_D ;
 Scope Fi A – положение осциллографа для измерения сигнала φ_A ;
 Scope Fi B – положение осциллографа для измерения сигнала φ_B ;
 Scope Fi C – положение осциллографа для измерения сигнала φ_C ;
 Scope Fi D – положение осциллографа для измерения сигнала φ_D ;
 Scope M AB – положение осциллографа для измерения сигнала M_{AB} ;
 Scope M BC – положение осциллографа для измерения сигнала M_{BC} ;
 Scope M BD – положение осциллографа для измерения сигнала M_{BD} ;
 Add 1, Add 2, ..., Add 13 – сумматоры;
 Gain 1, Gain 2, Gain 3, Gain 4 – усилители ($1/J_A, 1/J_B, 1/J_C, 1/J_D$);
 Gain 5, Gain 6, Gain 7 – усилители (C_{AB}, C_{BC}, C_{BD});
 Gain 8, Gain 9, Gain 10 – усилители ($\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}$);
 Integrator 1, Integrator 2, ..., Integrator 8 – интеграторы

Результаты и их обсуждение

Сняты показания осциллографов «Scope M A», «Scope M C» и «Scope M D» (рис. 3).

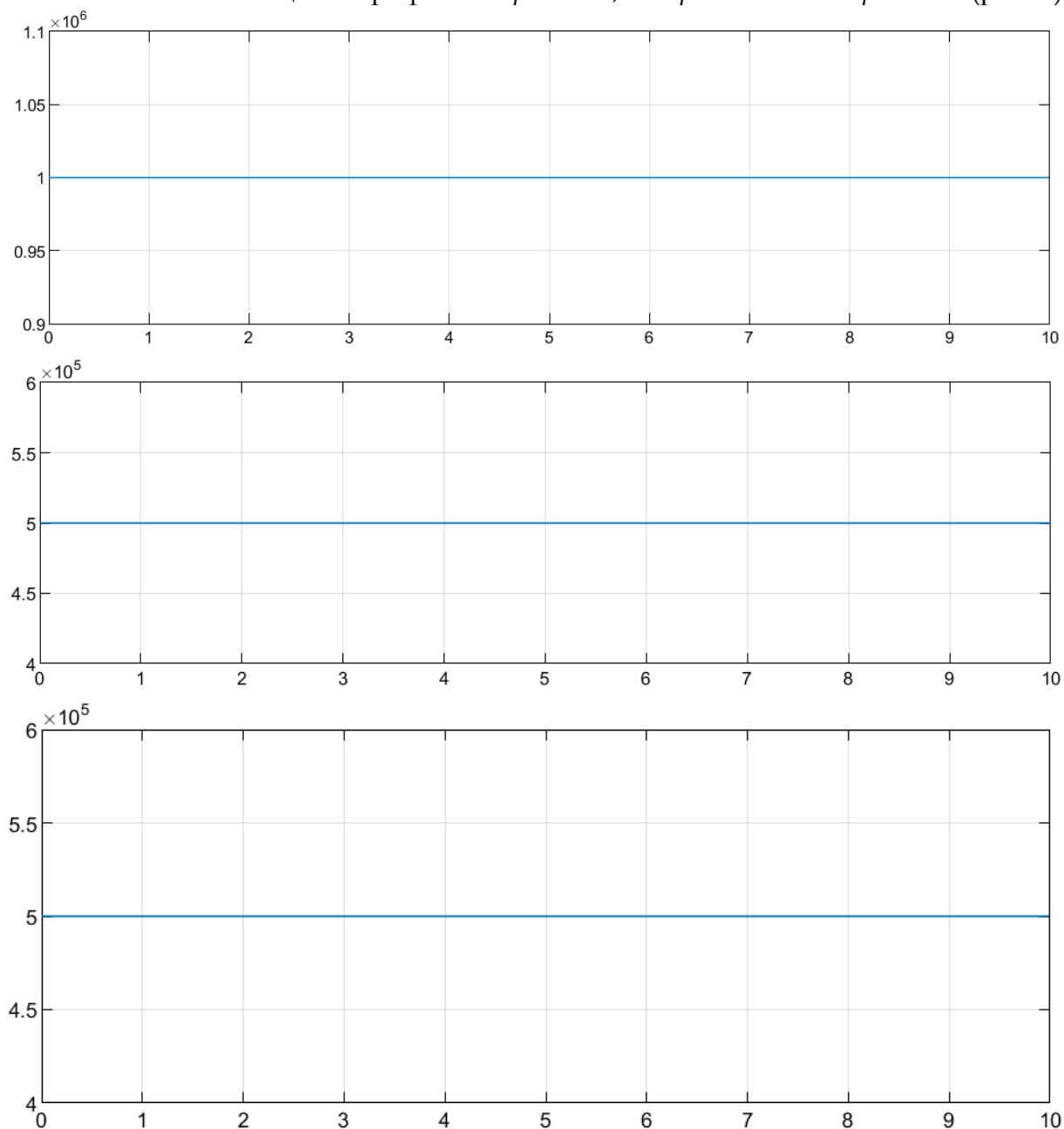


Рисунок 3. Simulink-осциллограммы $M_A(t)$, $M_C(t)$, $M_D(t)$

Simulink-осциллограммы показали правильность настройки блоков ступенчатого внешнего воздействия:

$$M_A = 1000 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_C = M_D = 500 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сняты показания осциллографов «Scope Eps A», «Scope Eps B», «Scope Eps C» и «Scope Eps D» (рис. 4).

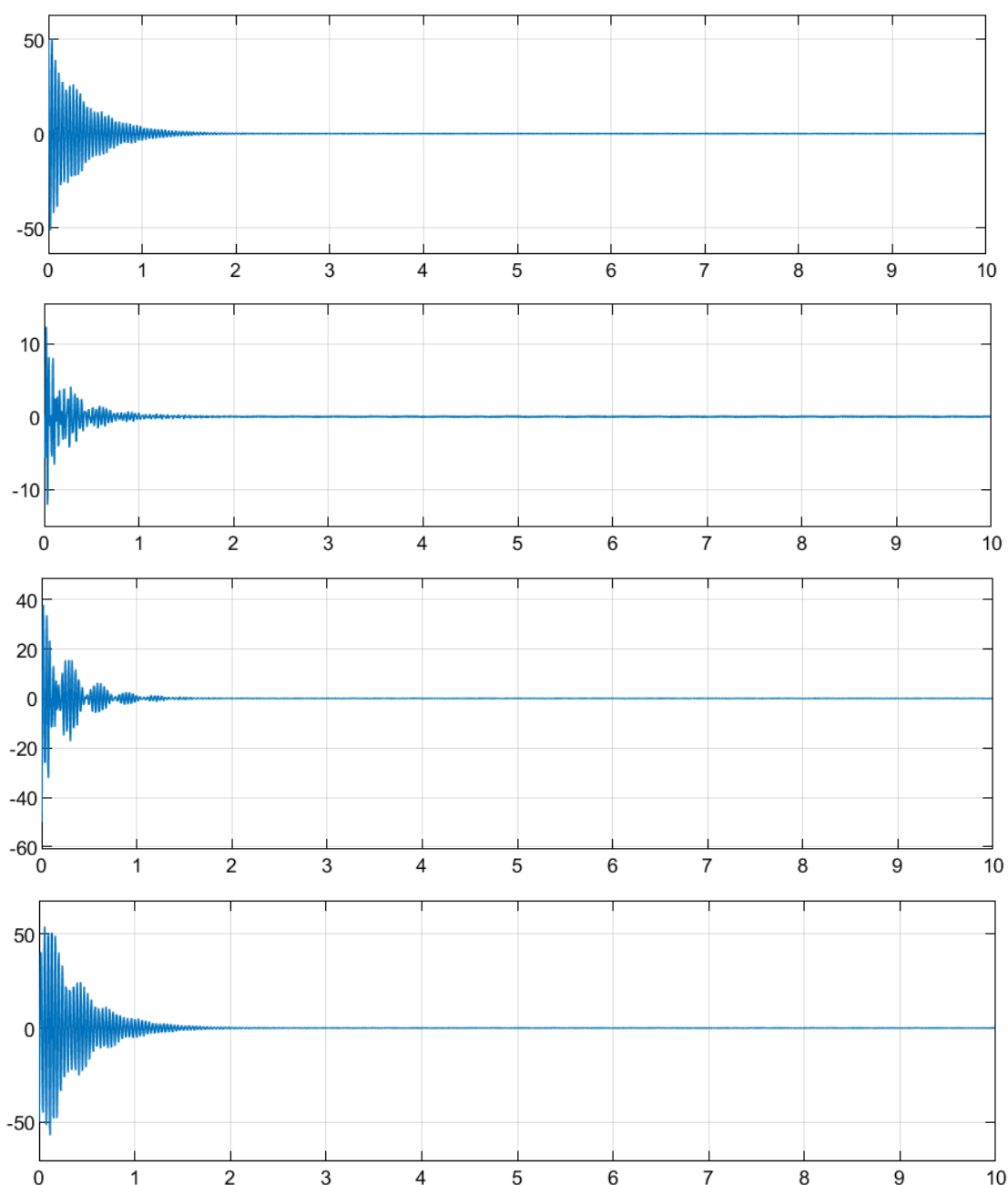


Рисунок 4. Simulink-осциллограммы $\varepsilon_A(t), \varepsilon_B(t), \varepsilon_C(t), \varepsilon_D(t)$

Simulink-осциллограммы показали диапазоны изменения во времени t [с] угловых ускорений $\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C, \varepsilon_D$ [рад/с²] и наличие затухающих крутильно-колебательных переходных процессов в электроприводе.

Сняты показания осциллографов «Scope От А», «Scope От В», «Scope От С» и «Scope От D» (рис. 5).

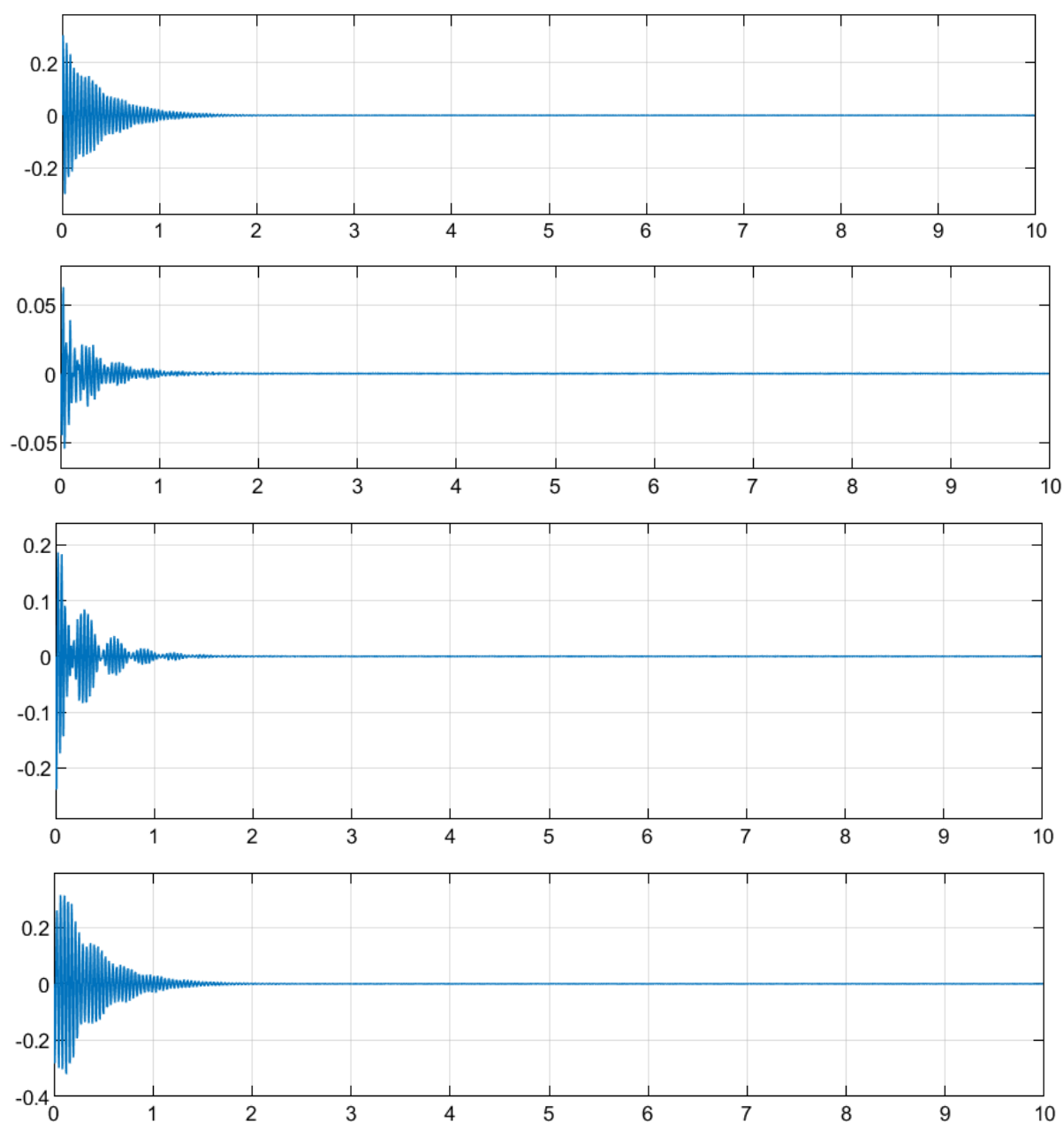


Рисунок 5. Simulink-осциллограммы $\omega_A(t), \omega_B(t), \omega_C(t), \omega_D(t)$

Simulink-осциллограммы показали диапазоны изменения во времени t [с] угловых скоростей $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ [рад/с] и наличие затухающих крутильно-колебательных переходных процессов в электроприводе.

Сняты показания осциллографов «Scope Fi A», «Scope Fi B», «Scope Fi C» и «Scope Fi D» (рис. 6).

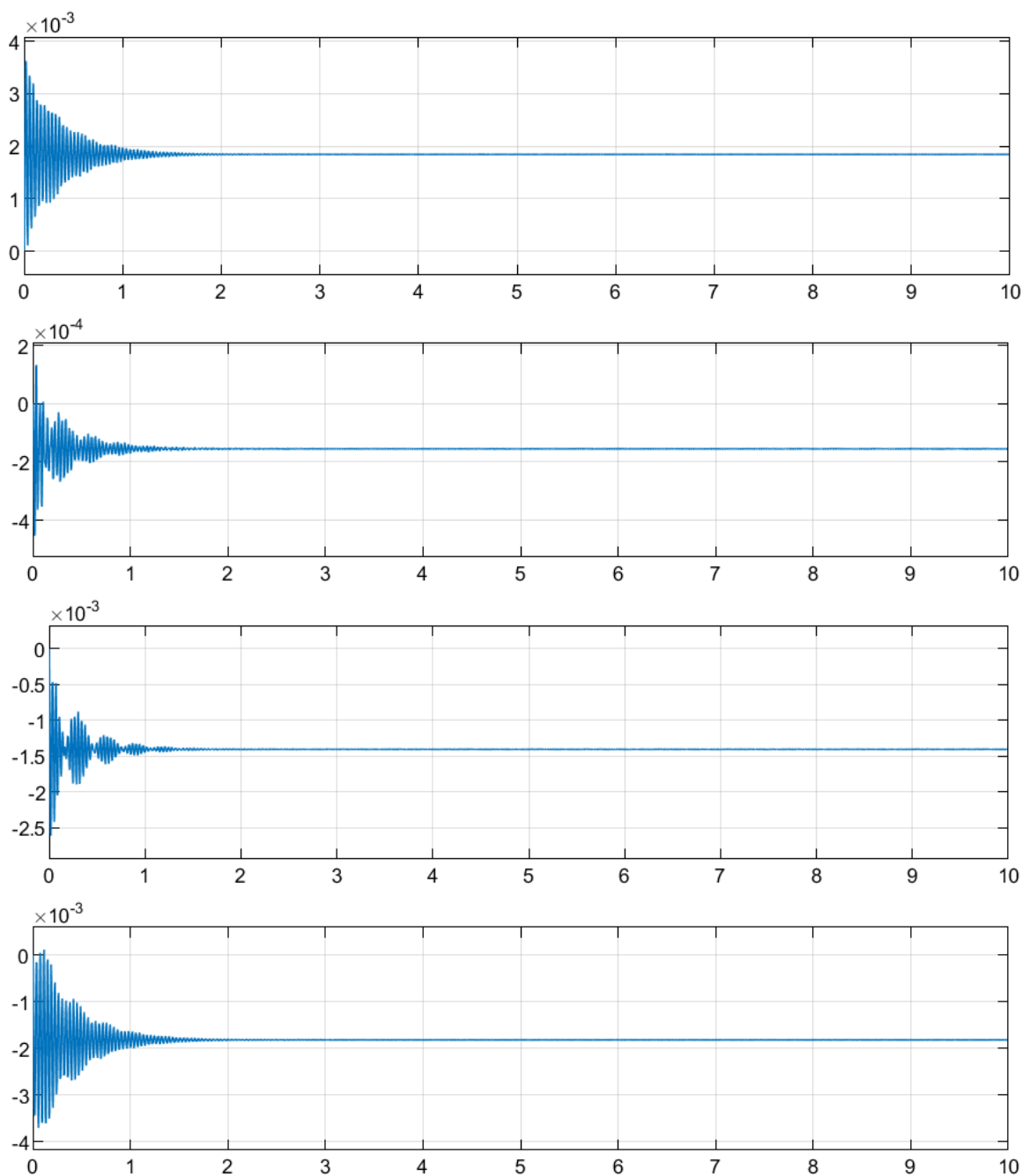


Рисунок 6. Simulink-осциллограммы $\varphi_A(t), \varphi_B(t), \varphi_C(t), \varphi_D(t)$

Simulink-осциллограммы показали диапазоны изменения во времени t [с] угловых координат $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$ [рад] и наличие затухающих крутильно-колебательных переходных процессов в электроприводе.

Сняты показания осциллографов «Scope M AB», «Scope M BC», «Scope M BD» (рис. 7).

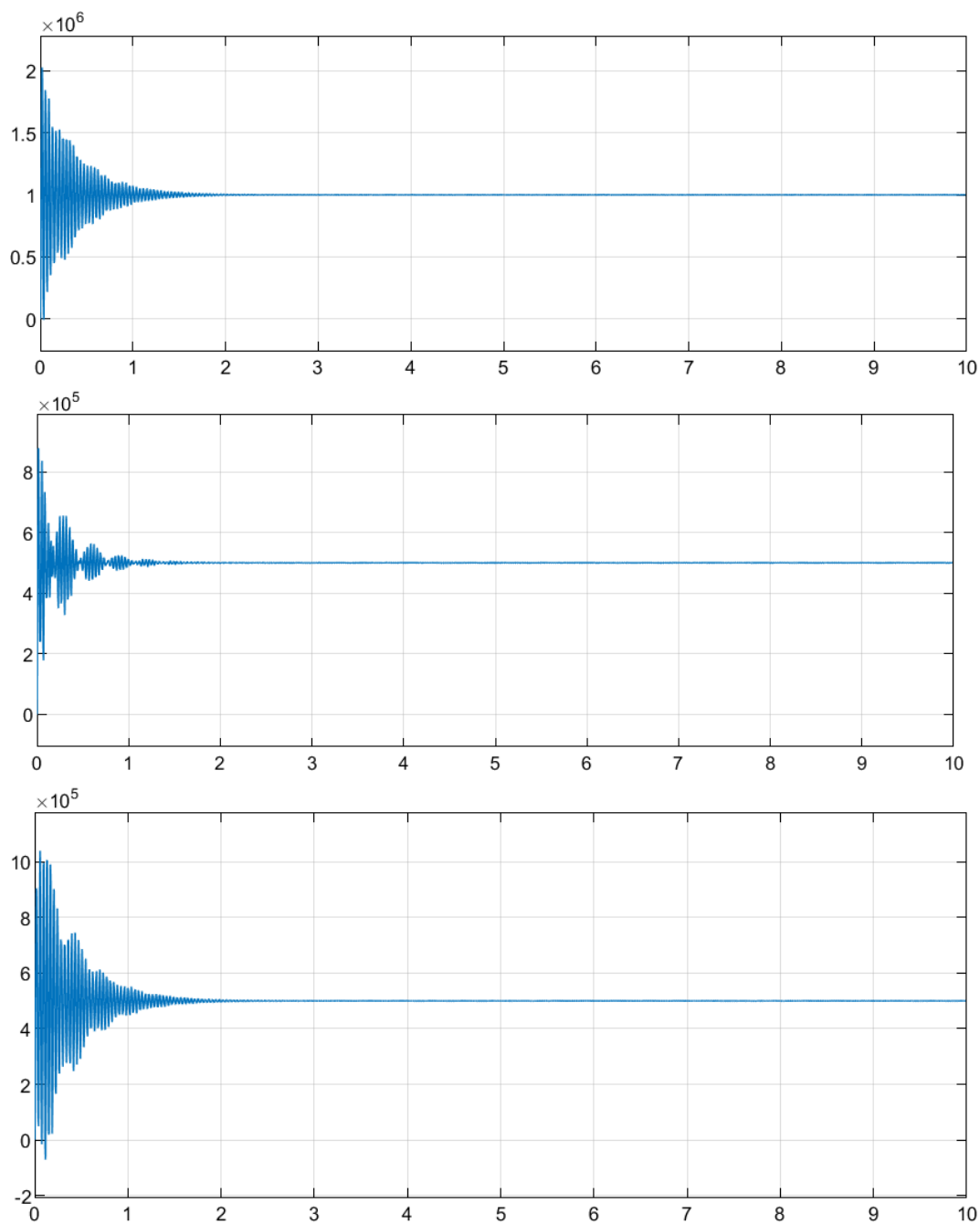


Рисунок 7. Simulink-осциллограммы $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{BD}(t)$

Simulink-осциллограммы показали диапазоны изменения во времени t [с] угловых координат M_{AB} , M_{BC} , M_{BD} [Н·м] и наличие затухающих крутильно-колебательных переходных процессов в электроприводе.

Заключение

Результаты этой научной статьи, полученные с использованием программного модуля Simulink, могут быть интересны студентам и аспирантам технических вузов, изучающим основы динамики и надежности металлургического оборудования для проектирования технологических машин и комплексов.

Список литературы

1. Мальцев А.А. Оптимизация конструкции машины ОМД на стадии проектирования средствами MATLAB и MathCAD. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №5. С.211–227. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-5-2021/a230317>.
2. Мальцев А.А., Тарасенко И.А. Оптимизация конструкции проектируемого электропривода машины ОМД средствами Simulink. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №6. С.115–120. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-6-2021/a230337>.
3. Харитонов С.А., Ципилев А.А. Динамика механических систем. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 200 с.

References

1. Andrey A. Maltsev. Optimization of the OMD machine design at the design stage by means of MATLAB and MathCAD. – [Electronic resource]. Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.5. P.211–227. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-5-2021/a230317>.
2. Andrey A. Maltsev., Irina A. Tarasenko. Optimization of the design of the projected electric drive of the OMD machine by means of Simulink. – [Electronic resource]. Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.6. P.115–120. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-6-2021/a230337>.
3. Kharitonov S.A., Tsipilev A.A. Dynamics of mechanical systems. – Moscow: BMSTU, 2017. – 200 p.