

УДК 621.771

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ SIMULINK-МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

**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](mailto:a.a.mal@bmstu.ru)

### Аннотация

Путем варьирования в широком диапазоне значений коэффициентов демпфирования оптимизирована крутильно-колебательная Simulink-модель электропривода прокатного стана по критерию минимизации длительности переходного процесса, вызванного ударом торца прокатываемой заготовки о рабочие валки.

**Ключевые слова:** Simulink, электропривод, переходный процесс, прокатка.

## 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

**Andrey A. Maltsev**

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

BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments

e-mail: [a.a.mal@bmstu.ru](mailto:a.a.mal@bmstu.ru)

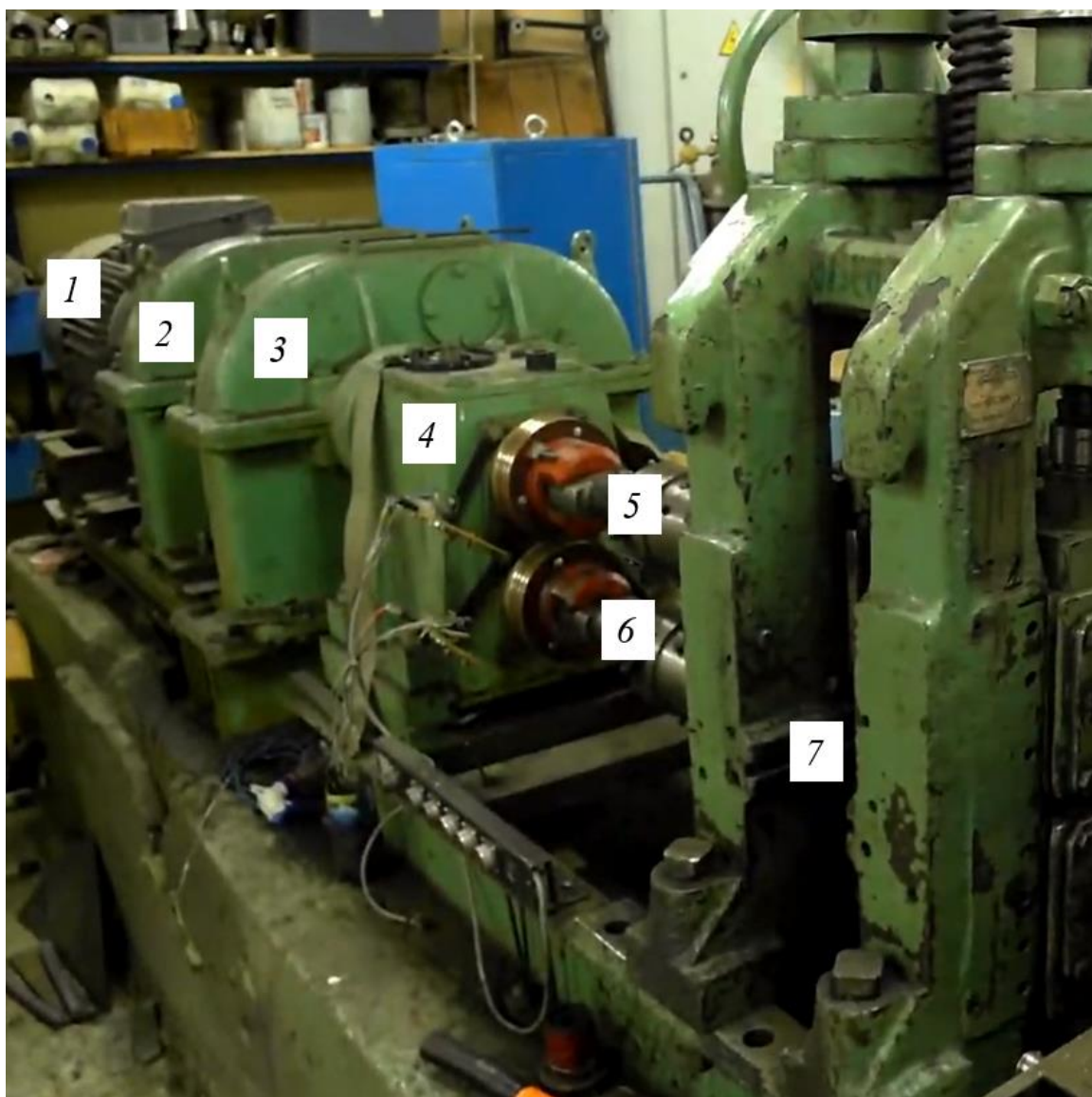
### ABSTRACT

By varying the damping coefficients in a wide range, the torsional-oscillatory Simulink model of the electric drive of a rolling mill is optimized according to the criterion of minimizing the duration of the transition process caused by the impact of the end of the rolled workpiece on the working rolls.

**Keywords:** Simulink, electric drive, transient, rolling.

**Введение**

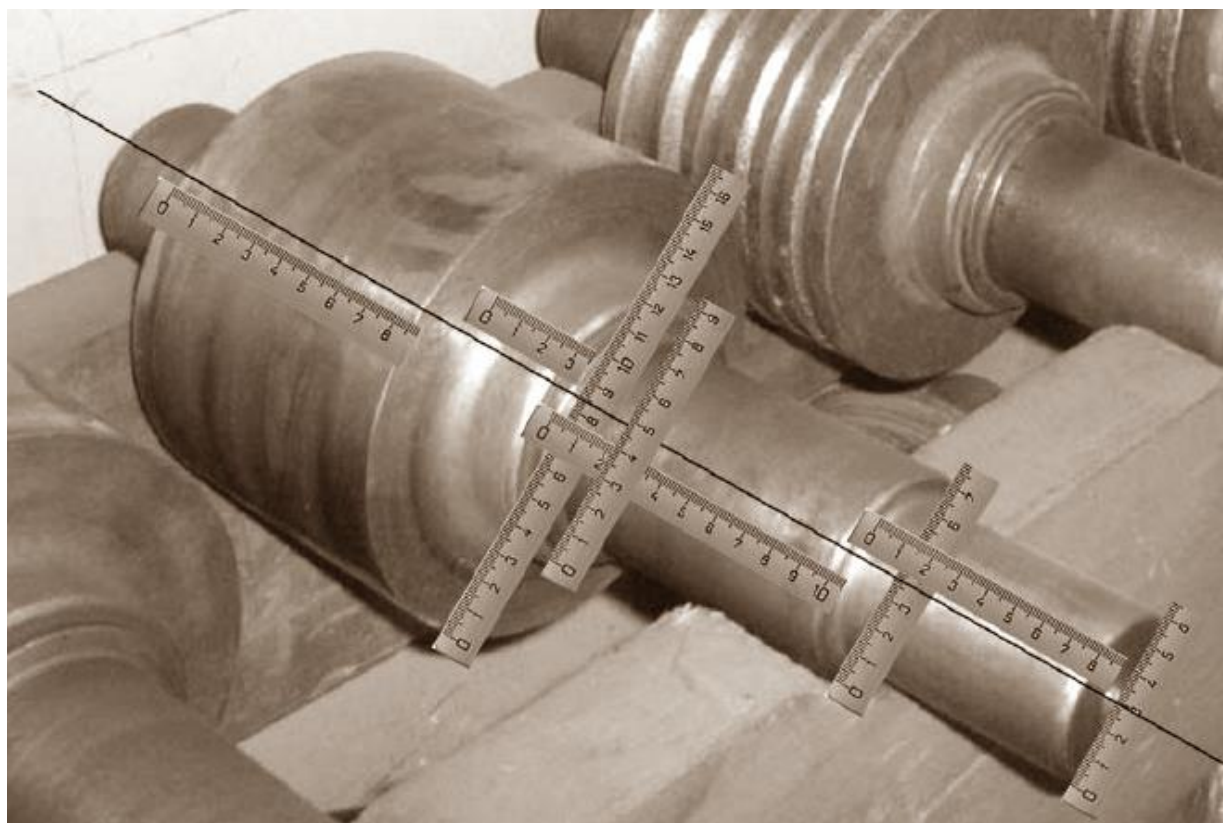
В качестве объекта исследования выбран производственный прокатный стан дуо-160 (рис. 1).



*Рисунок 1. Фотография прокатного стана дуо-160:*

- 1 – электродвигатель;*
- 2, 3 – редукторы;*
- 4 – шестеренная клеть;*
- 5, 6 – шпиндели;*
- 7 – рабочая клеть*

В рабочей клетки прокатного стана дуо-160 установлены два рабочих валка (технологический инструмент), которые вращаются в подшипниках навстречу друг другу и деформируют прокатываемую заготовку, придавая ей требуемую форму (рис. 2).



*Рисунок 2. Фотография рабочих валков на стеллаже*

Предметом исследования является переходный процесс (крутильные колебания) в электроприводе рабочих валков прокатного стана, вызванный ударом при захвате прокатываемой заготовки рабочими валками.

#### **Цель и задача исследования**

Цель исследования состоит в том, чтобы минимизировать длительность переходного процесса, негативно влияющего на работу электропривода.

Задача исследования заключается в построении адекватной Simulink-модели электропривода для проведения вычислительного эксперимента по изучению характера крутильных колебаний.

Материалы и методы исследования

По фотографиям составлена расчетная схема электропривода (рис. 3).

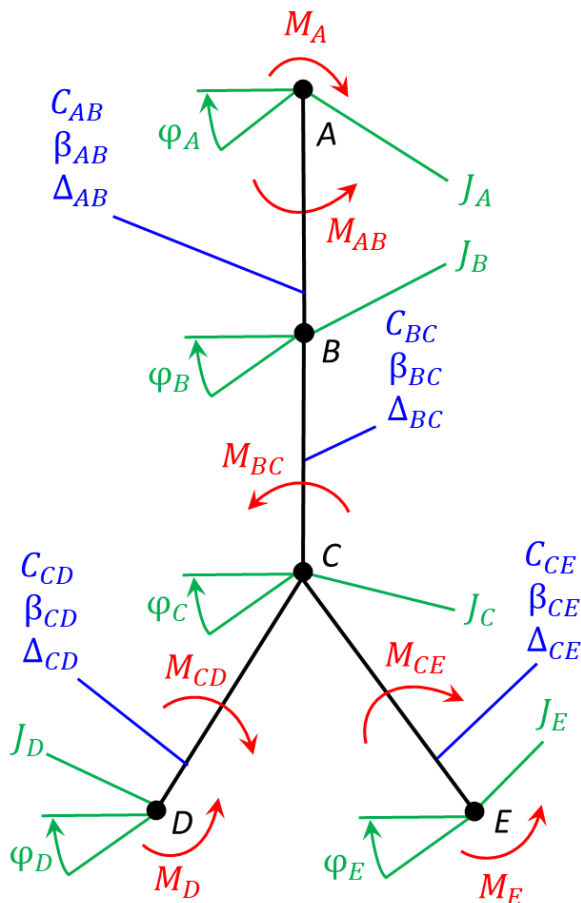


Рисунок 3. Крутильно-колебательная схема электропривода:

- $A, B, C, D, E$  – абсолютно жесткие диски (массы);
- $AB, BC, CD, CE$  – крутильно-упругие невесомые связи;
- $J_A, J_B, J_C, J_D, J_E$  – осевые моменты инерции дисков;
- $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D, \varphi_E$  – угловые координаты дисков;
- $C_{AB}, C_{BC}, C_{CD}, C_{CE}$  – крутильные жесткости связей;
- $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{CD}, \beta_{CE}$  – коэффициенты демпфирования;
- $\Delta_{AB}, \Delta_{BC}, \Delta_{CD}, \Delta_{CE}$  – люфты (угловые зазоры);
- $M_{AB}, M_{BC}, M_{CD}, M_{CE}$  – упругие крутящие моменты;
- $M_A$  – момент на выходном валу электродвигателя;
- $M_D$  – момент прокатки на верхнем рабочем валке;
- $M_E$  – момент прокатки на нижнем рабочем валке

Исходные материалы взяты из методических указаний к НИРС на тему «Исследование динамики прокатного стана и прогнозирование ресурса его работы» [1]:

$$J_A = 0,87 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_B = 0,38 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_C = 0,001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_D = J_E = 0,0001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_{AB} = 224\,000 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{рад};$$

$$C_{BC} = 963,9 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{рад};$$

$$\begin{aligned}C_{CD} &= C_{CE} = 414,4 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{рад}; \\ \beta_{AB} &= 0,545 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{м}; \\ \beta_{BC} &= 0,02 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{м}; \\ \beta_{CD} &= \beta_{CE} = 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{м}; \\ \Delta_{AB} &= \Delta_{BC} = \Delta_{CD} = \Delta_{CE} = 0 \text{ рад};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_A &= 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ M_D &= 600 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ M_E &= 400 \text{ Н} \cdot \text{м}.\end{aligned}$$

Неизвестные – угловые координаты, скорости и ускорения дисков:

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

Начальные условия:

$$\begin{aligned}\varphi_A(0) &= \varphi_B(0) = \varphi_C(0) = \varphi_D(0) = \varphi_E(0) = 0 \text{ рад}; \\ \omega_A(0) &= \omega_B(0) = \omega_C(0) = \omega_D(0) = \omega_E(0) = 0 \text{ рад}/\text{с}; \\ \varepsilon_A(0) &= \varepsilon_B(0) = \varepsilon_C(0) = \varepsilon_D(0) = \varepsilon_E(0) = 0 \text{ рад}/\text{с}^2; \\ M_{AB}(0) &= M_{BC}(0) = M_{CD}(0) = M_{CE}(0) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}.\end{aligned}$$

Для компьютерного исследования объекта методом имитационного моделирования построена математическая крутильно-колебательная модель электропривода [2, 3]:

$$\begin{aligned} J_A \varepsilon_A(t) + M_{AB}(t) &= M_A; \\ J_B \varepsilon_B(t) - M_{AB}(t) + M_{BC}(t) &= 0; \\ J_C \varepsilon_C(t) - M_{BC}(t) + M_{CD}(t) + M_{CE}(t) &= 0; \\ J_D \varepsilon_D(t) - M_{CD}(t) &= -M_D; \\ J_E \varepsilon_E(t) - M_{CE}(t) &= -M_E \end{aligned}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} \varepsilon_A(t) &= \frac{1000 - M_{AB}(t)}{0,87}; \\ \varepsilon_B(t) &= \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{0,38}; \\ \varepsilon_C(t) &= \frac{M_{BC}(t) - M_{CD}(t) - M_{CE}(t)}{0,001}; \\ \varepsilon_D(t) &= \frac{M_{CD}(t) - 600}{0,0001}; \\ \varepsilon_E(t) &= \frac{M_{CE}(t) - 400}{0,0001}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} M_{AB}(t) &= C_{AB} [\varphi_A(t) - \varphi_B(t)] + \beta_{AB} [\omega_A(t) - \omega_B(t)]; \\ M_{BC}(t) &= C_{BC} [\varphi_B(t) - \varphi_C(t)] + \beta_{BC} [\omega_B(t) - \omega_C(t)]; \\ M_{CD}(t) &= C_{CD} [\varphi_C(t) - \varphi_D(t)] + \beta_{CD} [\omega_C(t) - \omega_D(t)]; \\ M_{CE}(t) &= C_{CE} [\varphi_C(t) - \varphi_E(t)] + \beta_{CE} [\omega_C(t) - \omega_E(t)] \end{aligned}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} M_{AB}(t) &= 224\,000 [\varphi_A(t) - \varphi_B(t)] + 0,545 [\omega_A(t) - \omega_B(t)]; \\ M_{BC}(t) &= 963,9 [\varphi_B(t) - \varphi_C(t)] + 0,02 [\omega_B(t) - \omega_C(t)]; \\ M_{CD}(t) &= 414,4 [\varphi_C(t) - \varphi_D(t)] + 0,001 [\omega_C(t) - \omega_D(t)]; \\ M_{CE}(t) &= 414,4 [\varphi_C(t) - \varphi_E(t)] + 0,001 [\omega_C(t) - \omega_E(t)]. \end{aligned}$$

Результаты и их обсуждение

Построена Simulink-модель электропривода (рис. 4, 5, 6).

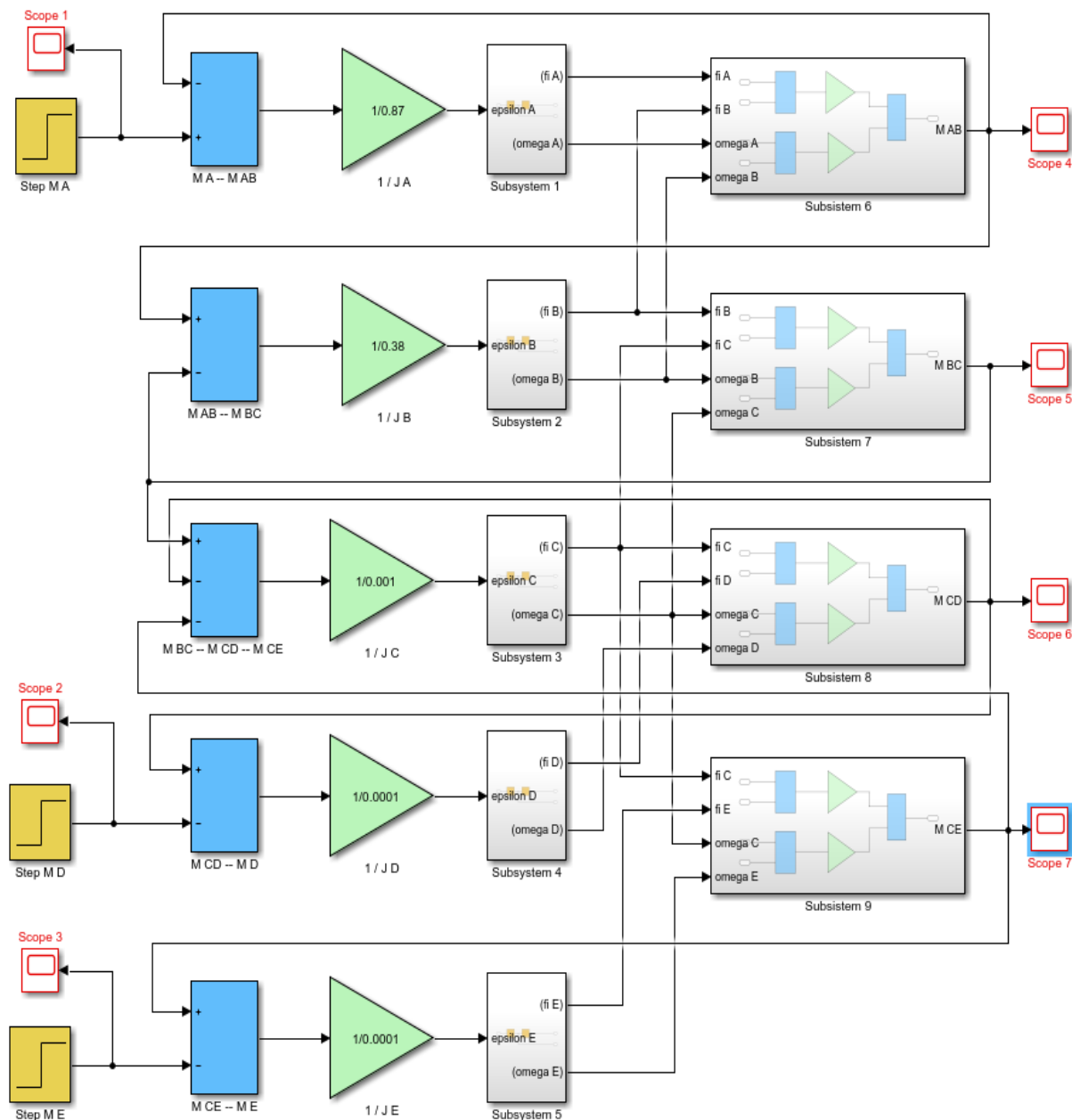


Рисунок 4. Simulink-модель электропривода:

Step MA – блок ступенчатого внешнего воздействия на величину  $M_A$ ;

Step MD – блок ступенчатого внешнего воздействия на величину  $M_D$ ;

Step ME – блок ступенчатого внешнего воздействия на величину  $M_E$ ;

Scope 1, Scope 2, ..., Scope 7 – осциллографы;

Subsystem 1, Subsystem 2, ..., Subsystem 9 – подсистемы

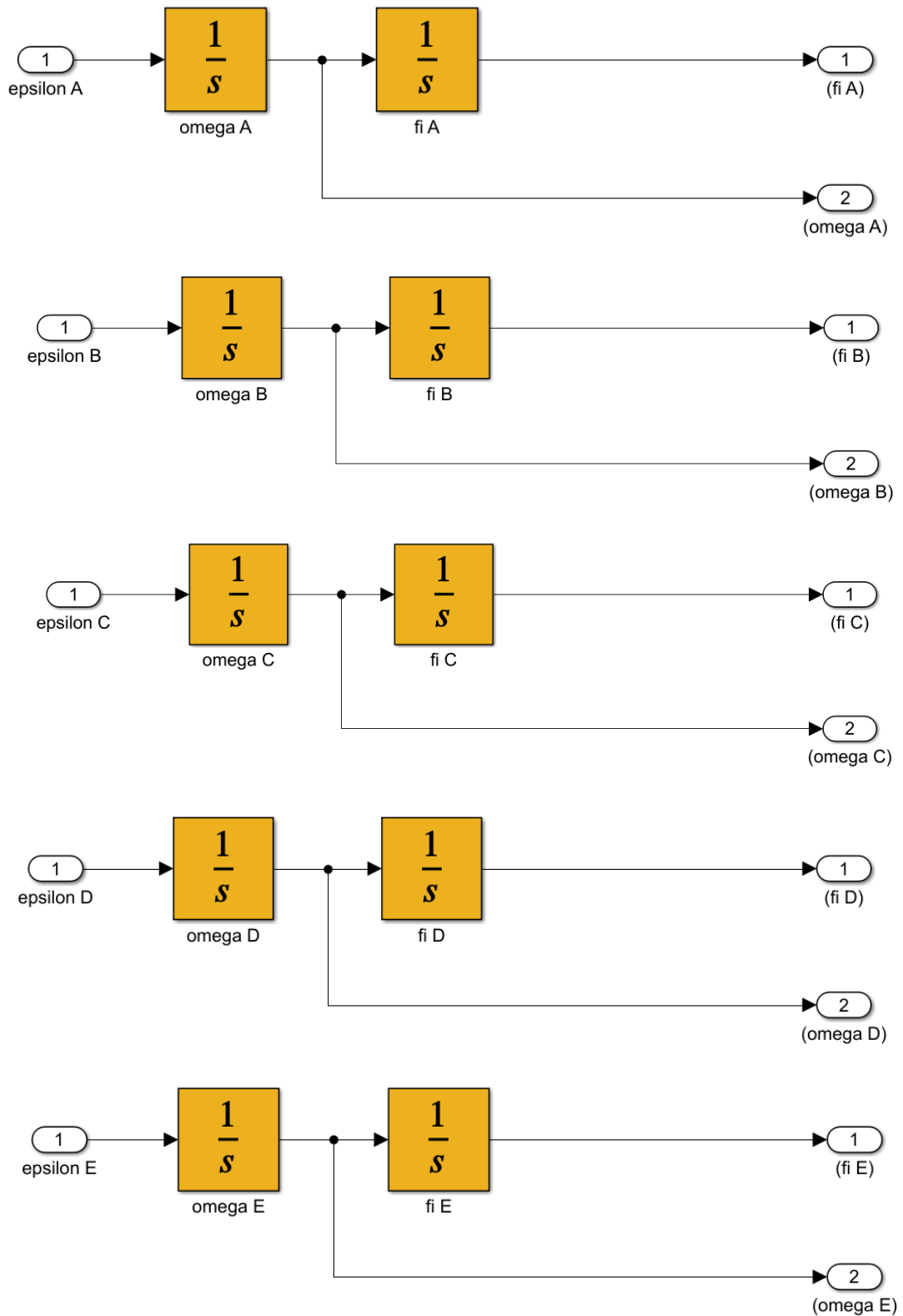


Рисунок 5. Подсистемы Subsystem 1, Subsystem 2, ..., Subsystem 5:  
Блоки «1/s» – интеграторы входного сигнала



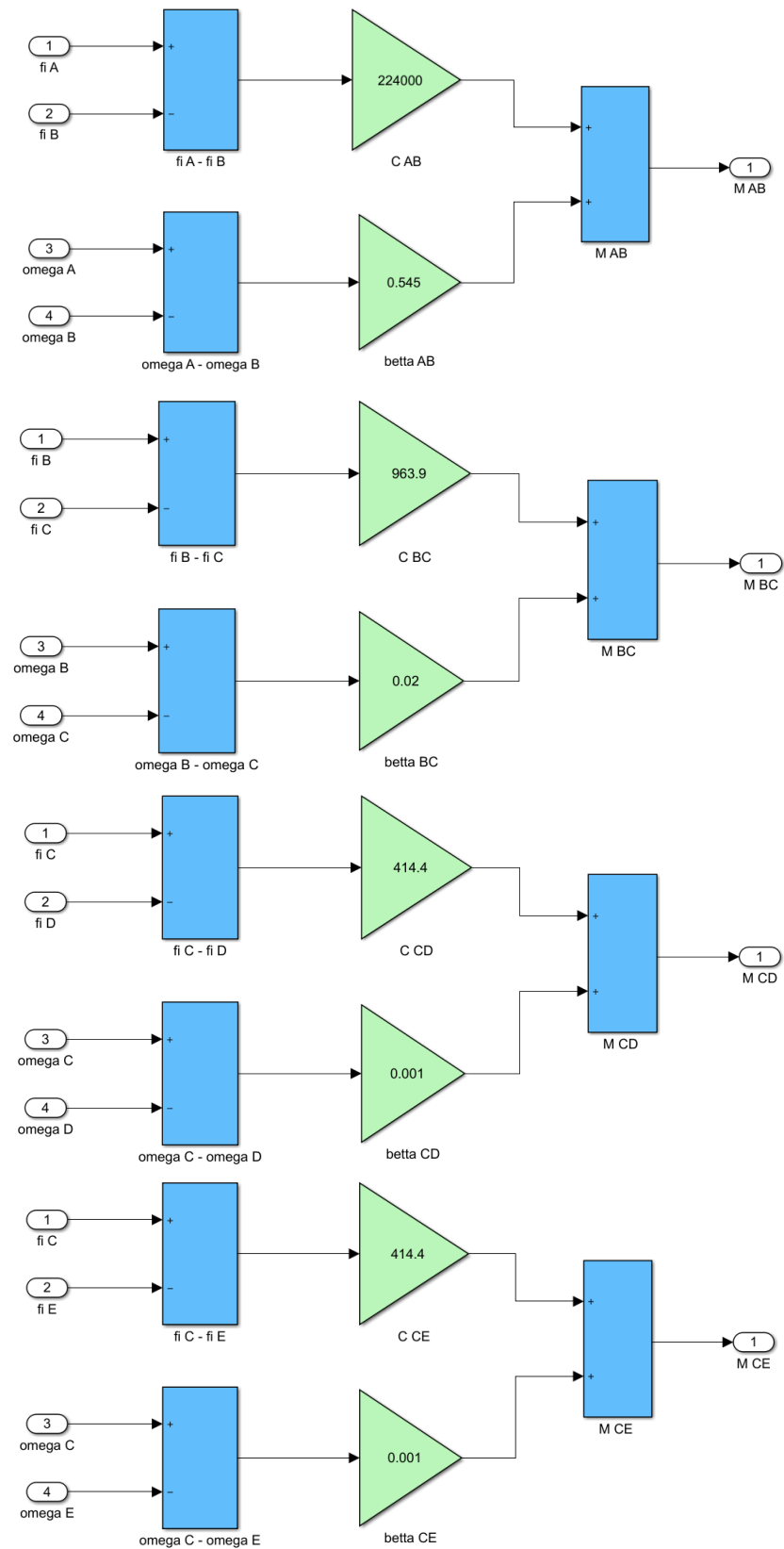
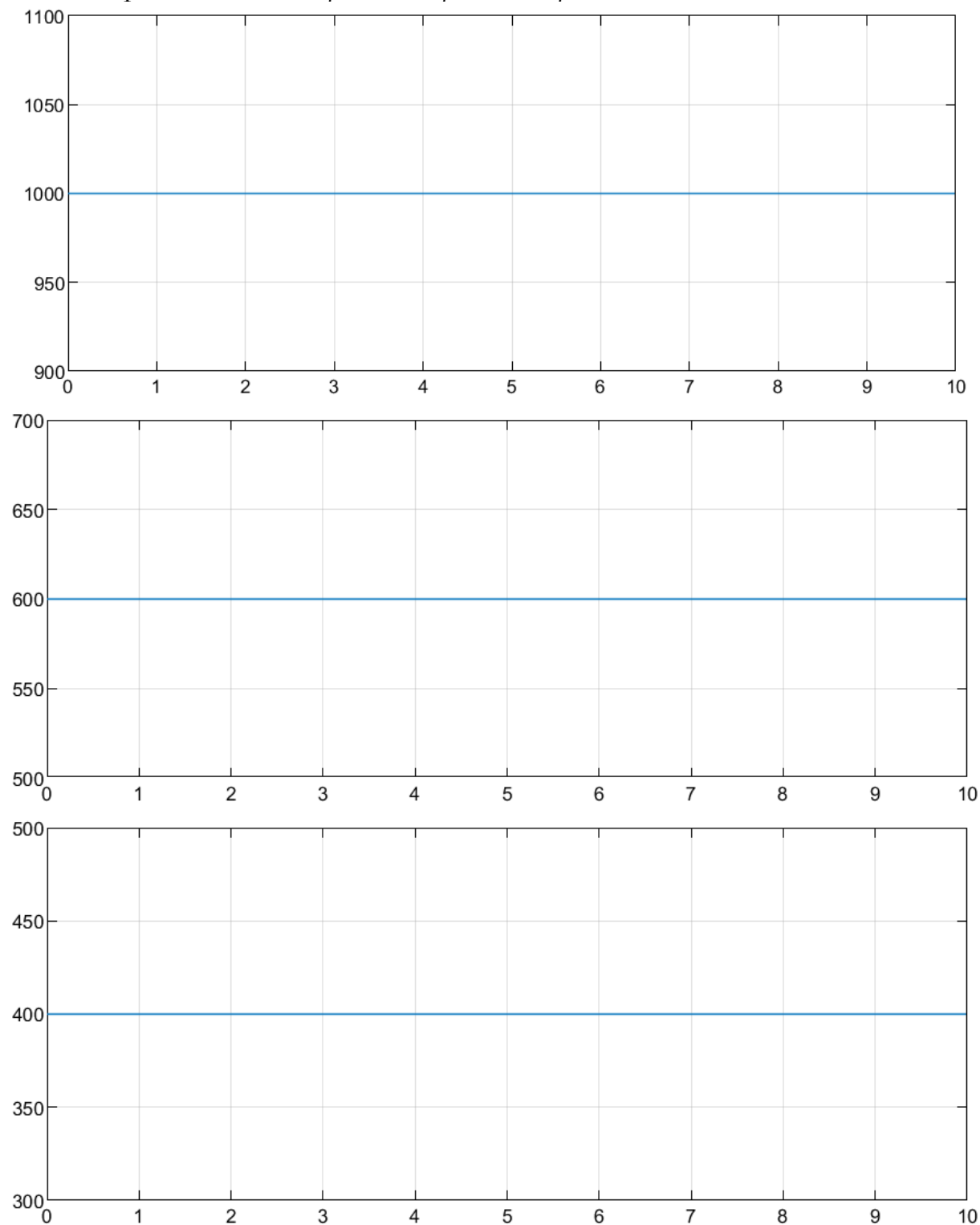


Рисунок 6. Подсистемы Subsystem 6, Subsystem 7, ..., Subsystem 9

Сняты показания осциллографов *Scope 1*, *Scope 2*, *Scope 3* (рис. 7) — доказательство правильности настройки блоков *Step M A*, *Step M D*, *Step M E*.



**Рисунок 7.** *Simulink*-осциллограммы внешних моментов:  
 $M_A(t) = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_D(t) = 600 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_E(t) = 400 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Сняты показания *Scope 4*, *Scope 5*, *Scope 6*, *Scope 7*, свидетельствующие о значительных крутильных колебаниях в электроприводе (рис. 8).

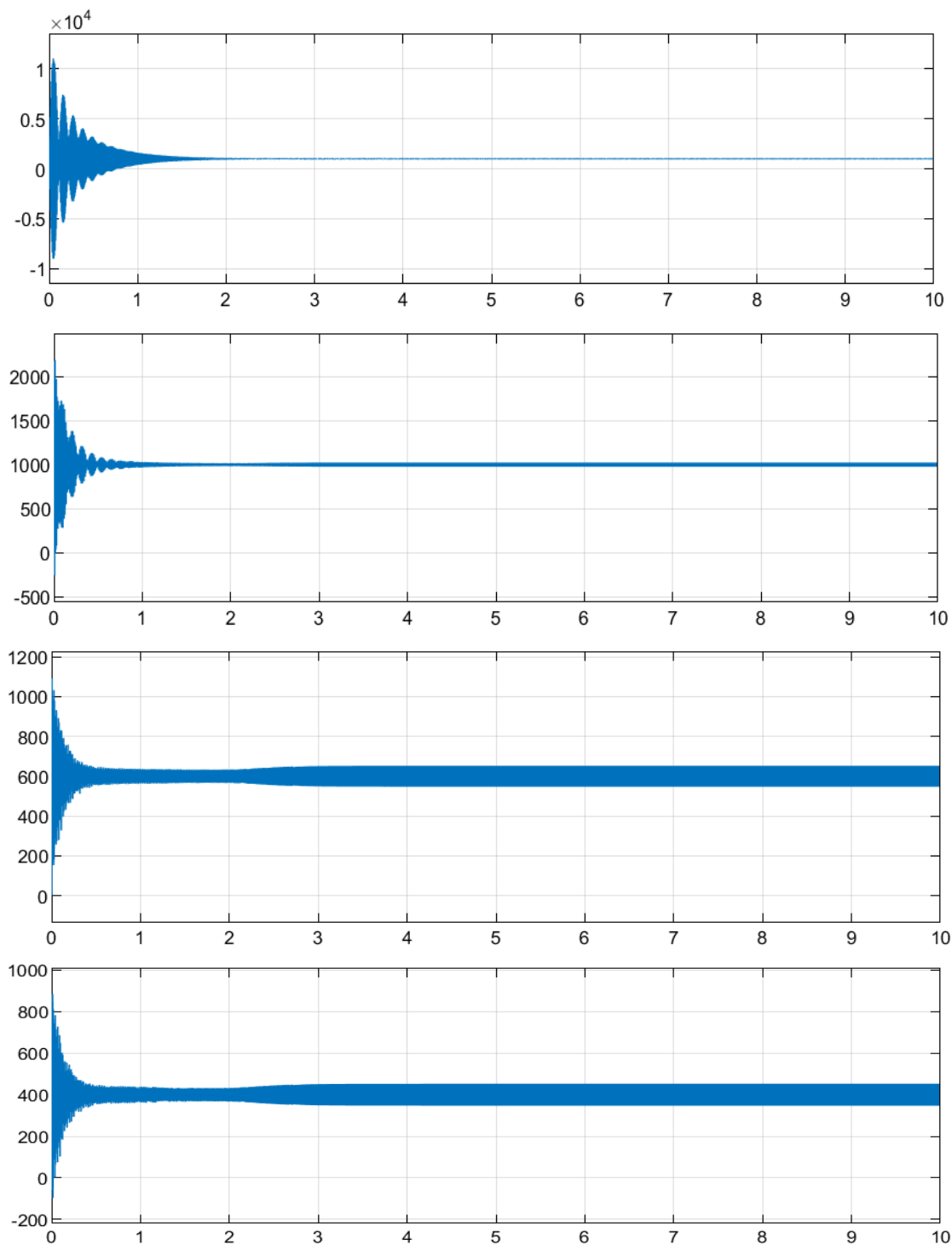
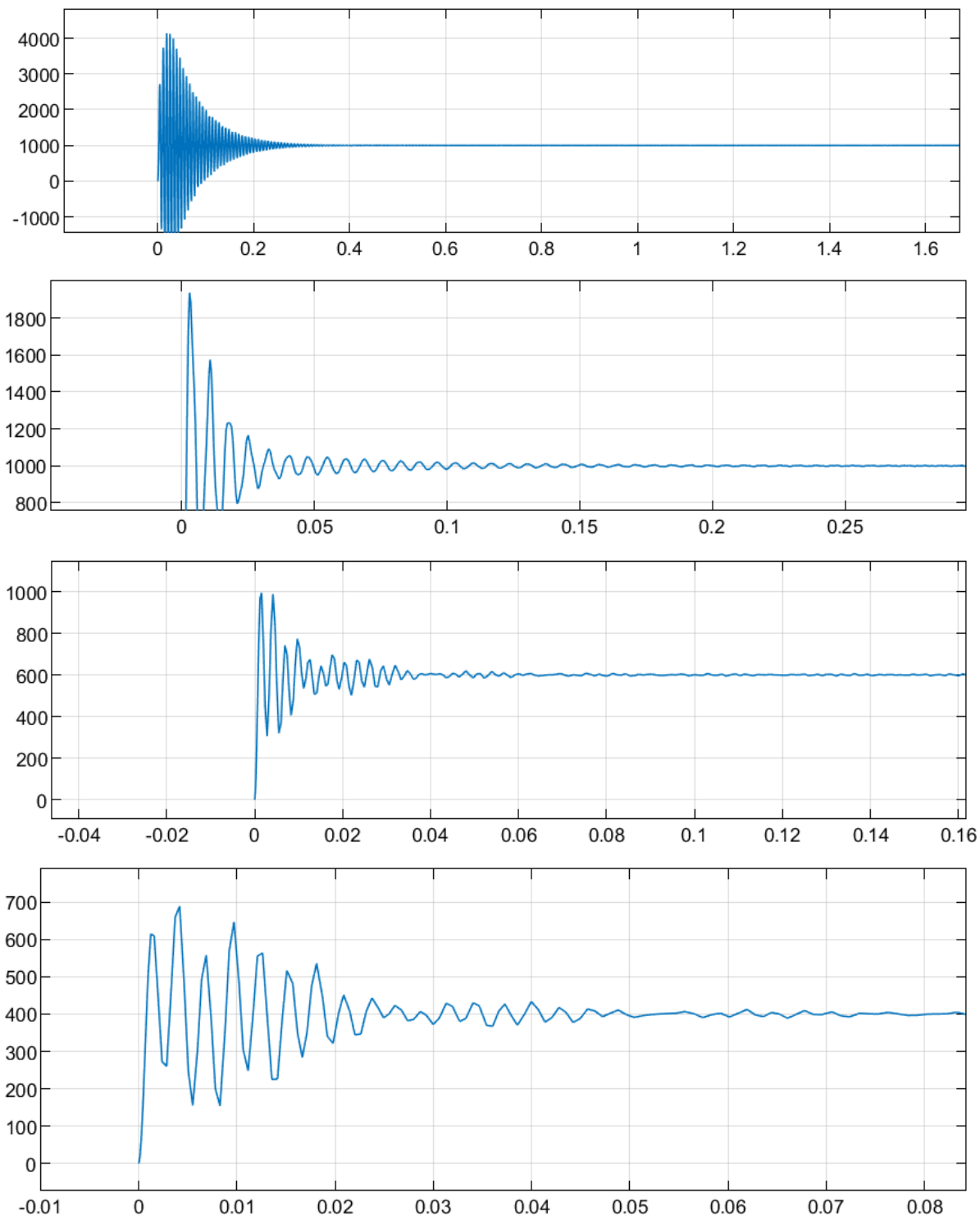


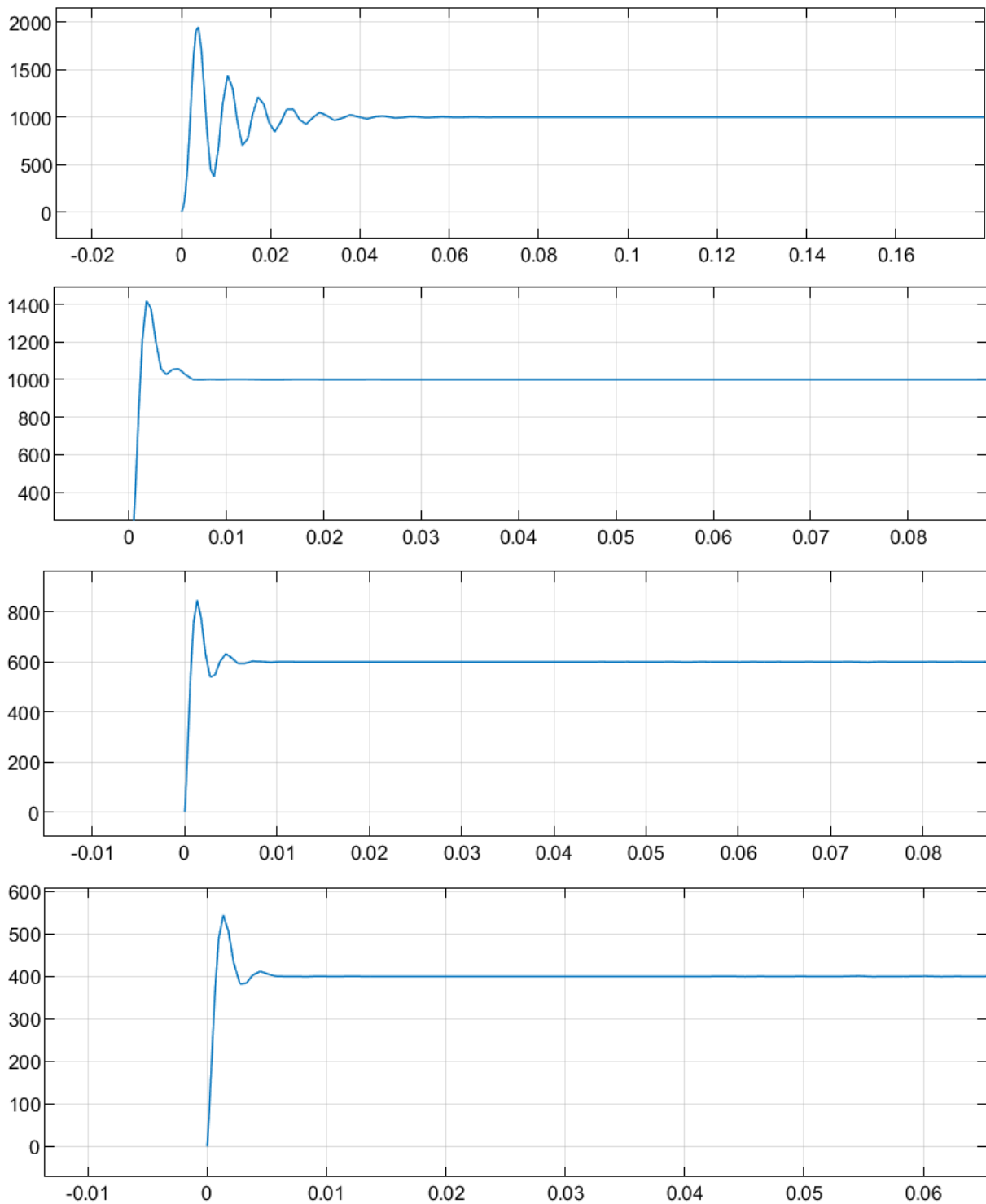
Рисунок 8. Simulink-осциллограммы  $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{CD}(t), M_{CE}(t)$   
при  $\beta_{AB} = 0,545$ ;  $\beta_{BC} = 0,02$ ;  $\beta_{CD} = \beta_{CE} = 0,001$  [Н·м·с/м]

При увеличении коэффициентов демпфирования в 10 раз наблюдается значительное подавление крутильных колебаний в электроприводе (рис. 9).



**Рисунок 9.** Осциллограммы  $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{CD}(t), M_{CE}(t)$   
 при  $\beta_{AB} = 5,45; \beta_{BC} = 0,2; \beta_{CD} = \beta_{CE} = 0,01$  [Н·м·с/м]

При увеличении коэффициентов демпфирования в 100 раз наблюдается еще большее подавление крутильных колебаний в электроприводе (рис. 10).



**Рисунок 10.** Осциллограммы  $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{CD}(t), M_{CE}(t)$   
 при  $\beta_{AB} = 54,5; \beta_{BC} = 2; \beta_{CD} = \beta_{CE} = 0,1$  [Н·м·с/м]

**Заключение**

Многokратным увеличением значений коэффициентов демпфирования удается полностью подавить крутильные колебания в электроприводе прокатного стана. Прoделанный вычислительный эксперимент по изучению характера крутильных колебаний послужит основой для написания мною методических рекомендаций к будущей виртуальной лабораторной работе, выполняемой студентами в среде Simulink дистанционно.

**Список литературы**

1. Мальцев А.А. Динамика и прочность электропривода клетки дуо-160. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 44 [8] с.
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. 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>.

**References**

1. Andrey A. Maltsev. Dynamics and strength of the electric drive of the duo-160 crate. – Moscow: BMSTU, 2016. – 44 [8] p.
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. 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>.