

УДК 621.771

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ КРУТИЛЬНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ
МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА ПУТЕМ
ВЫДЕЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМ В 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**

При выполнении ориентировочного динамического расчета на стадии конструирования нового прокатного стана найден оптимальный вариант конфигурации построенной в Simulink крутильно-колебательной модели электропривода рабочих валков.

Ключевые слова: электропривод, металлургия, колебания, конструирование.

**OPTIMIZATION OF THE TORSIONAL-OSCILLATORY MODEL
CONFIGURATION OF THE ROLLING MILL ELECTRIC DRIVE BY
ALLOCATING SUBSYSTEMS IN 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**

When performing an approximate dynamic calculation at the design stage of a new rolling mill, the optimal configuration of the torsional-oscillatory model of the working rolls electric drive built in Simulink was found.

Keywords: electric drive, metallurgy, vibrations, engineering.

Актуальность.

Исследуемый двухвалковый прокатный стан находится на той стадии конструирования, когда возникает необходимость динамического расчета крутильных колебаний в его электроприводе (рис. 1).

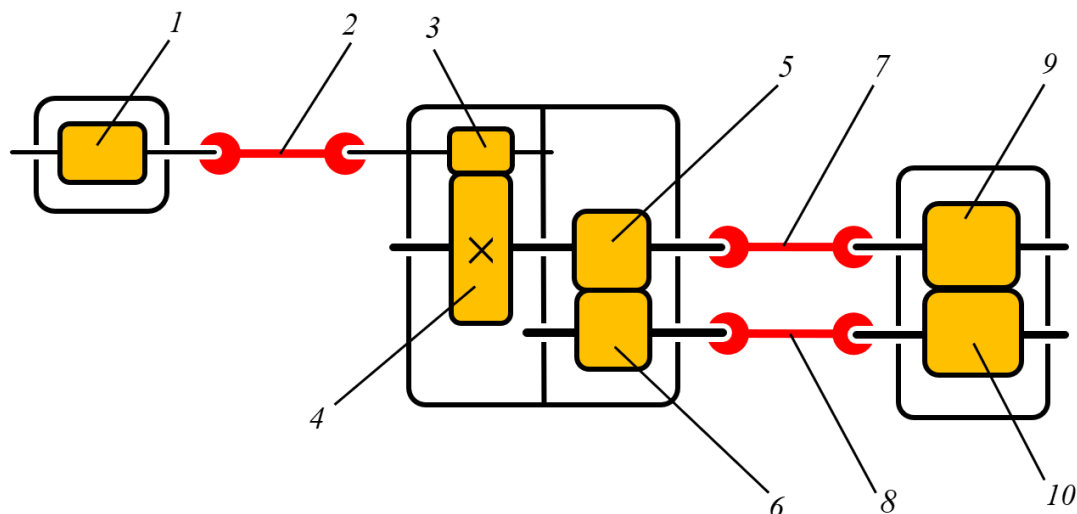


Рисунок 1. Кинематическая схема электропривода:

- 1 – ротор электродвигателя;
- 2 – предохранительный шпиндель;
- 3 – вал-шестерня редуктора;
- 4 – зубчатое колесо редуктора;
- 5 – верхний шестеренный валок;
- 6 – нижний шестеренный валок;
- 7 – верхний шпиндель;
- 8 – нижний шпиндель;
- 9 – верхний рабочий валок;
- 10 – нижний рабочий валок

На приведенной кинематической схеме электродвигатель, редуктор-шестеренная клеть и двухвалковая рабочая клеть соединены между собой тензометрическими шпинделями для контроля крутящего момента на всех трех участках электропривода и подтверждения достоверности результатов теоретического исследования крутильных колебаний.

Цель исследования.

Исследование проводится с целью подготовки к написанию учебно-методического пособия для студентов, изучающих дисциплину «Основы динамики и надежности металлургического оборудования».

Для этого необходимо подробно отработать все этапы динамического расчета электропривода прокатного стана, прежде всего этап построения в компьютерной среде Simulink математической крутильно-колебательной модели [1, 2, 3, 4, 5].

Особое внимание должно быть уделено поиску возможности упрощения конфигурации (структурной оптимизации) блочной модели электропривода всеми доступными способами, например, путем выделения в среде Simulink многоуровневых,

встроенных друг в друга подсистем «Subsystem», а также заменой одноканальных блоков «Signal Builder» и «Scope» многоканальными.

Материалы и методы исследования.

Сущность метода математического моделирования состоит в том, что электропривод прокатного стана (оригинал) заменяется его математической моделью. Другими словами, для получения новой информации об оригинале необходимо всесторонне изучить поведение крутильно-колебательной модели электропривода с разветвленной структурой (рис. 2)

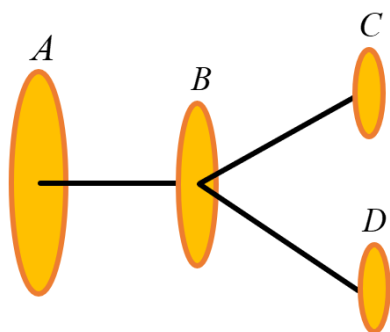


Рисунок 2. Структура модели электропривода:

A, B, C, D – массивные диски;

AB, BC, BD – невесомые упругие связи

Осевые моменты инерции дисков A, B, C, D :

$$J_A = 3,5 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2 \text{]};$$

$$J_B = 1,7 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2 \text{]};$$

$$J_C = 0,3 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2 \text{]};$$

$$J_D = 0,3 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2 \text{]}.$$

Крутильные жесткости связей AB, BC, BD :

$$C_{AB} = 37\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]};$$

$$C_{BC} = 19\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]};$$

$$C_{BD} = 19\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}.$$

Демпфирование в связях AB, BC, BD :

$$\beta_{AB} = 10 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]};$$

$$\beta_{BC} = 5 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]};$$

$$\beta_{BD} = 5 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]}.$$

Угловые ускорения дисков A, B, C, D :

$$\varepsilon_A = \frac{M_A - M_{AB}}{J_A};$$

$$\varepsilon_B = \frac{M_{AB} - M_{BC} - M_{BD}}{J_B};$$

$$\varepsilon_C = \frac{M_{BC} - M_C}{J_C};$$

$$\varepsilon_D = \frac{M_{BD} - M_D}{J_D},$$

Моменты сил упругости связей AB, BC, BD :

$$M_{AB} = C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B) + \beta_{AB}(\omega_A - \omega_B);$$

$$M_{BC} = C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C) + \beta_{BC}(\omega_B - \omega_C);$$

$$M_{BD} = C_{BD}(\varphi_B - \varphi_D) + \beta_{BD}(\omega_B - \omega_D).$$

Начальные угловые координаты дисков A, B, C, D:

$$\varphi_A(0) = \varphi_B(0) = \varphi_C(0) = \varphi_D(0) = 0 \text{ [рад]}.$$

Начальные угловые скорости дисков A, B, C, D:

$$\omega_A(0) = \omega_B(0) = \omega_C(0) = \omega_D(0) = 0 \text{ [рад/с]}.$$

Начальные угловые ускорения дисков A, B, C, D:

$$\varepsilon_A(0) = \varepsilon_B(0) = \varepsilon_C(0) = \varepsilon_D(0) = 0 \text{ [рад/с}^2\text{]}.$$

Начальные моменты сил упругости связей AB, BC, BD:

$$M_{AB}(0) = M_{BC}(0) = M_{BD}(0) = 0 \text{ [Н} \cdot \text{м]}.$$

Момент со стороны электродвигателя

$$M_A = 800\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м]}.$$

Момент прокатки на верхний рабочий валок

$$M_C = 500\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м]}.$$

Момент прокатки на нижний рабочий валок

$$M_D = 300\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м]}.$$

Результаты и их обсуждение.

В среде Simulink построена блочная крутильно-колебательная модель электропривода рабочих валков (рис. 3).

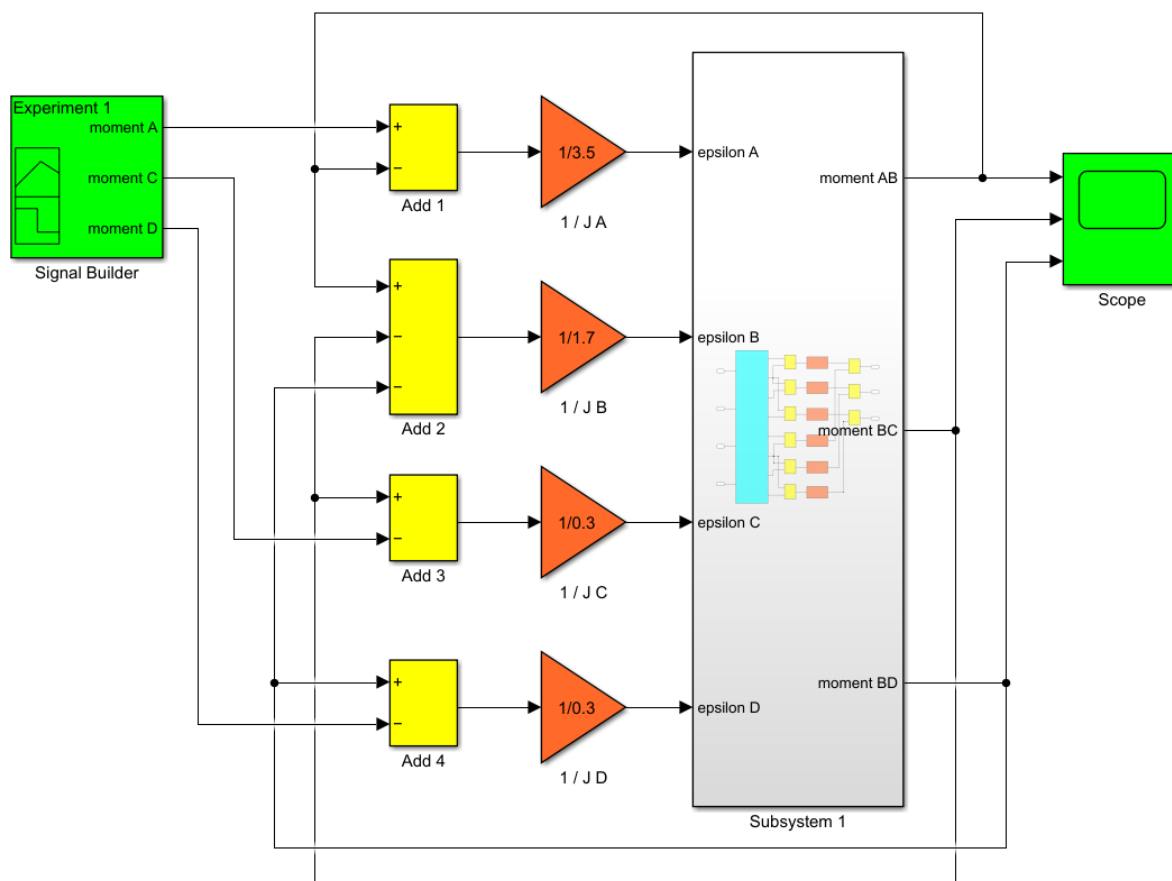


Рисунок 3. Модель электропривода в Simulink:
Signal Builder – построитель трех входных сигналов:

Входной сигнал «moment A» – момент M_A ;
 Входной сигнал «moment C» – момент M_C ;
 Входной сигнал «moment D» – момент M_D ;
 Scope – трехканальный осциллограф;
 Add 1, Add 2 ... Add 4 – сумматоры;
 $1/J_A$ – коэффициент усиления, равный $1/J_A$;
 $1/J_B$ – коэффициент усиления, равный $1/J_B$;
 $1/J_C$ – коэффициент усиления, равный $1/J_C$;
 $1/J_D$ – коэффициент усиления, равный $1/J_D$;
 Subsystem 1 – подсистема первого уровня

Конфигурация крутильно-колебательной модели оптимизирована в Simulink путем выделения подсистем «Subsystem 1» и «Subsystem 2» (рис. 4, 5).

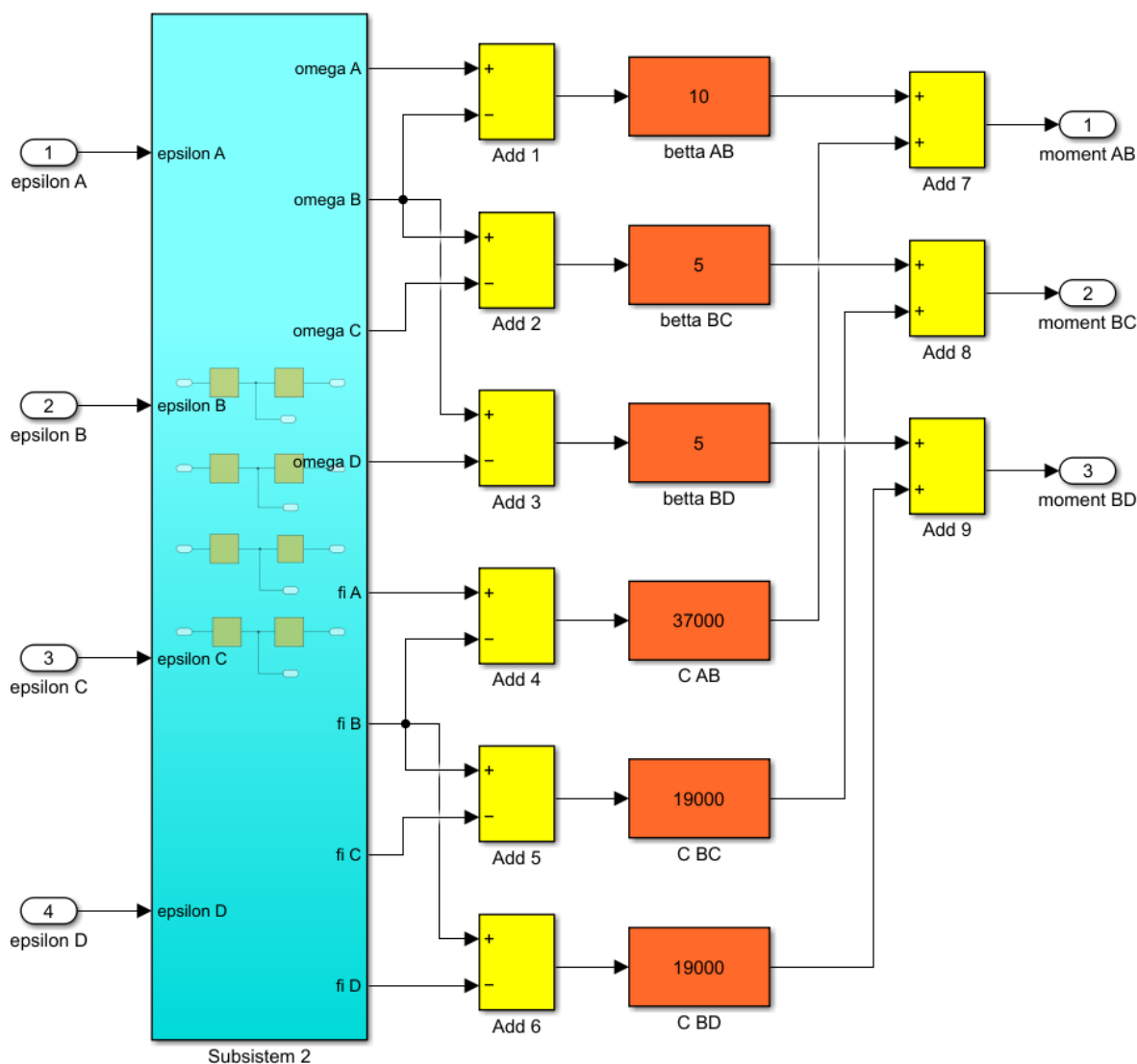


Рисунок 4. Подсистема «Subsystem 1»:
 Subsystem 2 – подсистема второго уровня;
 Add 1, Add 2, ..., Add 9 – сумматоры;

epsilon A, epsilon B, epsilon C, epsilon D – $\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C, \varepsilon_D$;
moment AB, moment BC, moment BD – M_{AB}, M_{BC}, M_{BD} ;
beta AB, beta BC, beta BD – $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}$;
C AB, C BC, C BD – C_{AB}, C_{BC}, C_{BD}

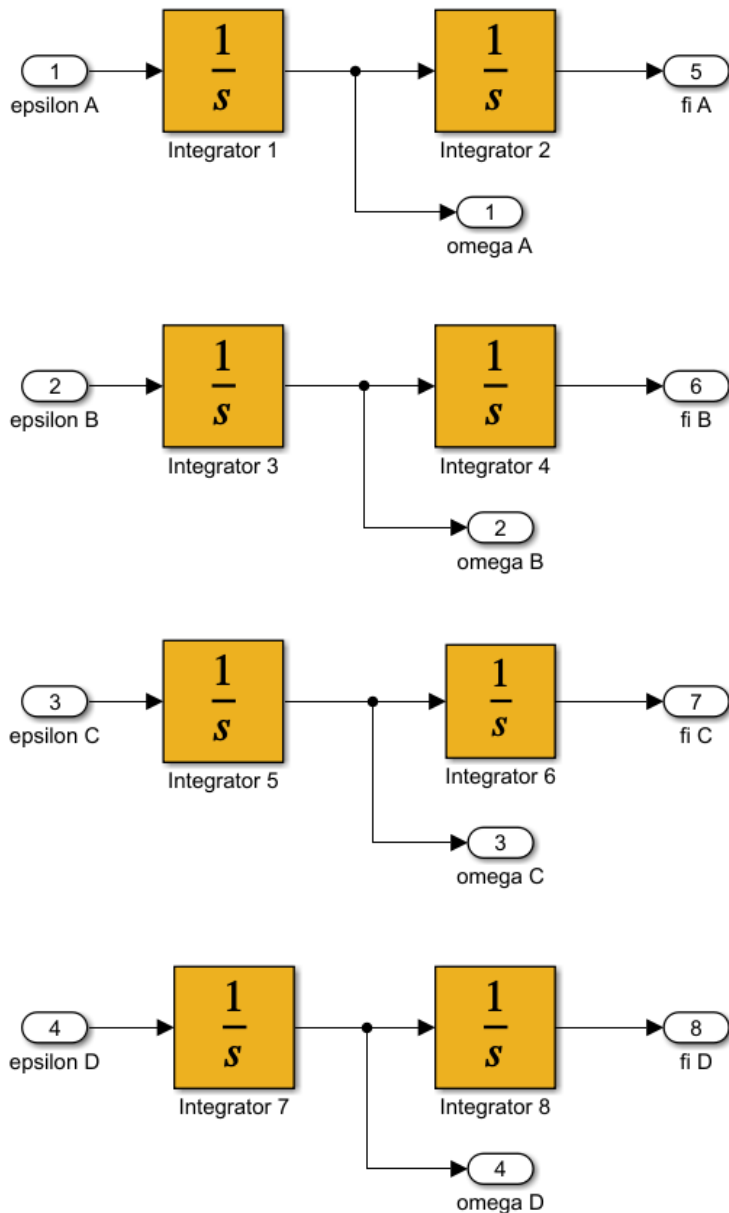


Рисунок 5. Подсистема «Subsystem 2»:

Integrator 1, Integrator 2, ..., Integrator 3 – интеграторы;
epsilon A, epsilon B, epsilon C, epsilon D – $\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C, \varepsilon_D$;
omega A, omega B, omega C, omega D – $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$;
fi A, fi B, fi C, fi D – $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$;

Получены графические результаты первого эксперимента при условии, что внешние моменты $M_A = M_C = M_D = 0$ (рис. 6).

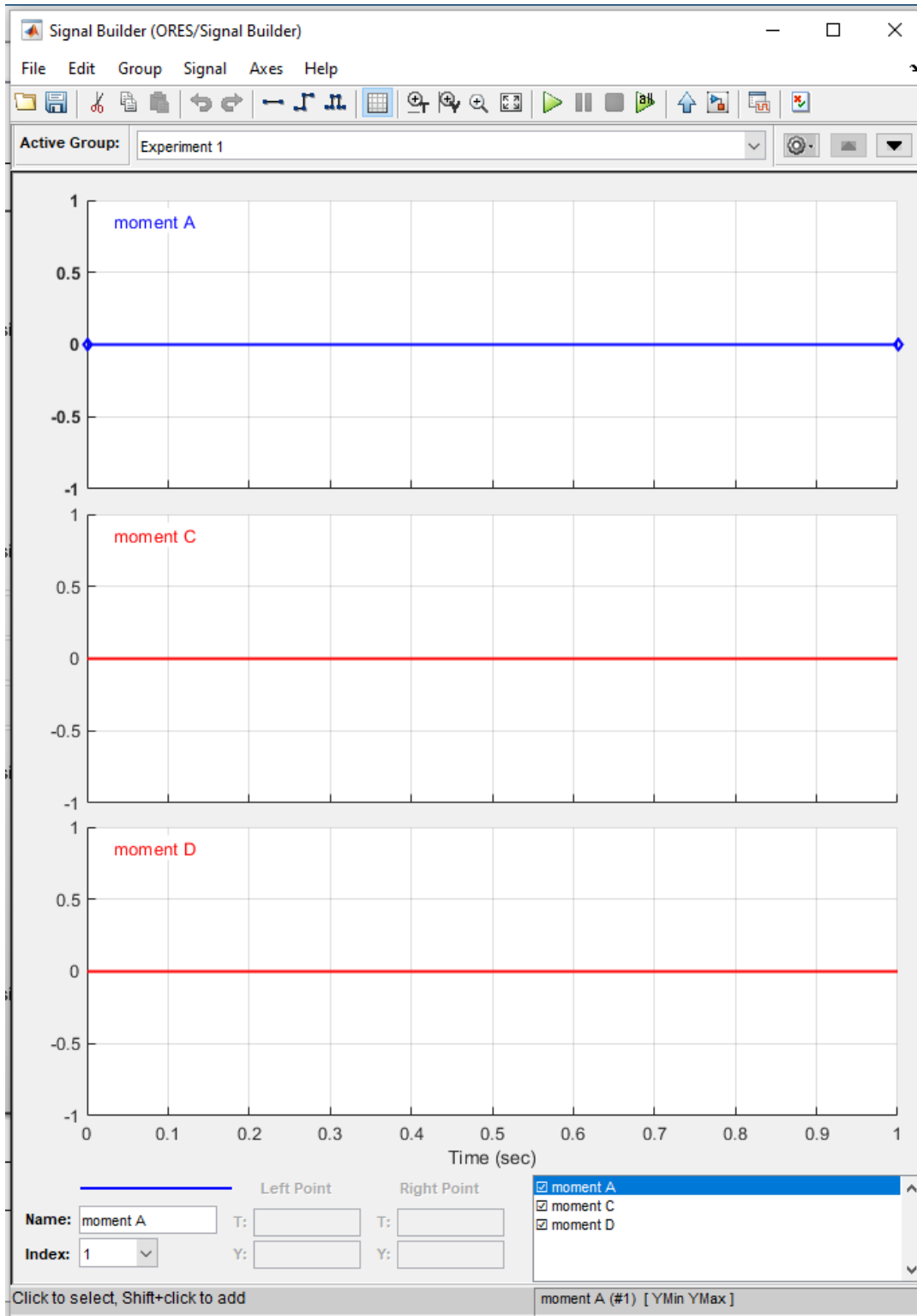


Рисунок 6. Эксперимент 1: нулевые сигналы $M_A(t)$, $M_C(t)$, $M_D(t)$

Результаты первого эксперимента показали, что построенная крутильно-колебательная модель ведет себя правильно: $M_{AB} = M_{BC} = M_{BD} = 0$ (рис. 7).

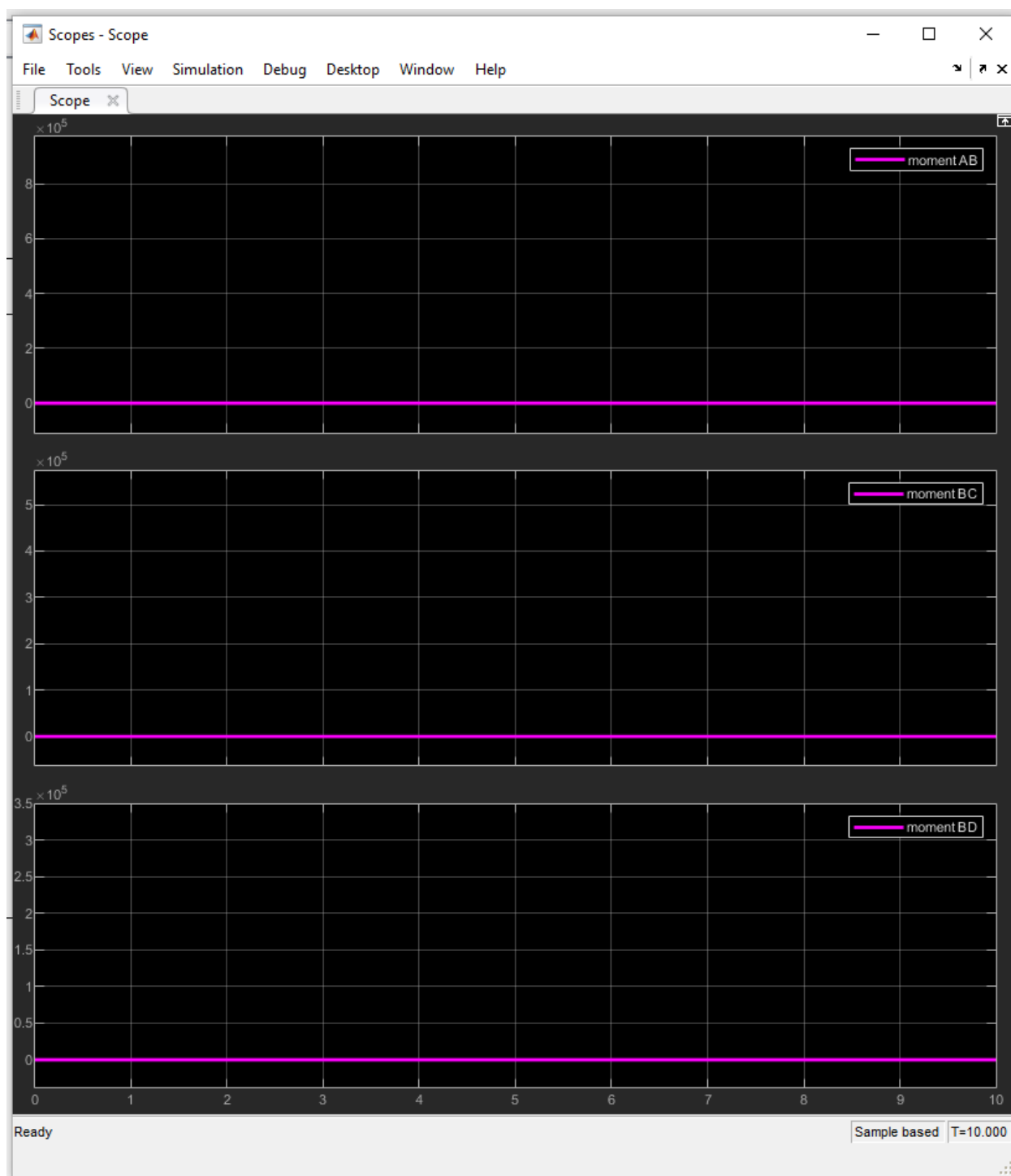


Рисунок 7. Эксперимент 1: осциллограммы $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$, $M_{BD}(t)$

Получены графические результаты второго эксперимента, когда внешние моменты M_A , M_C , M_D были заданы как кусочно-линейные функции времени t (рис. 8).

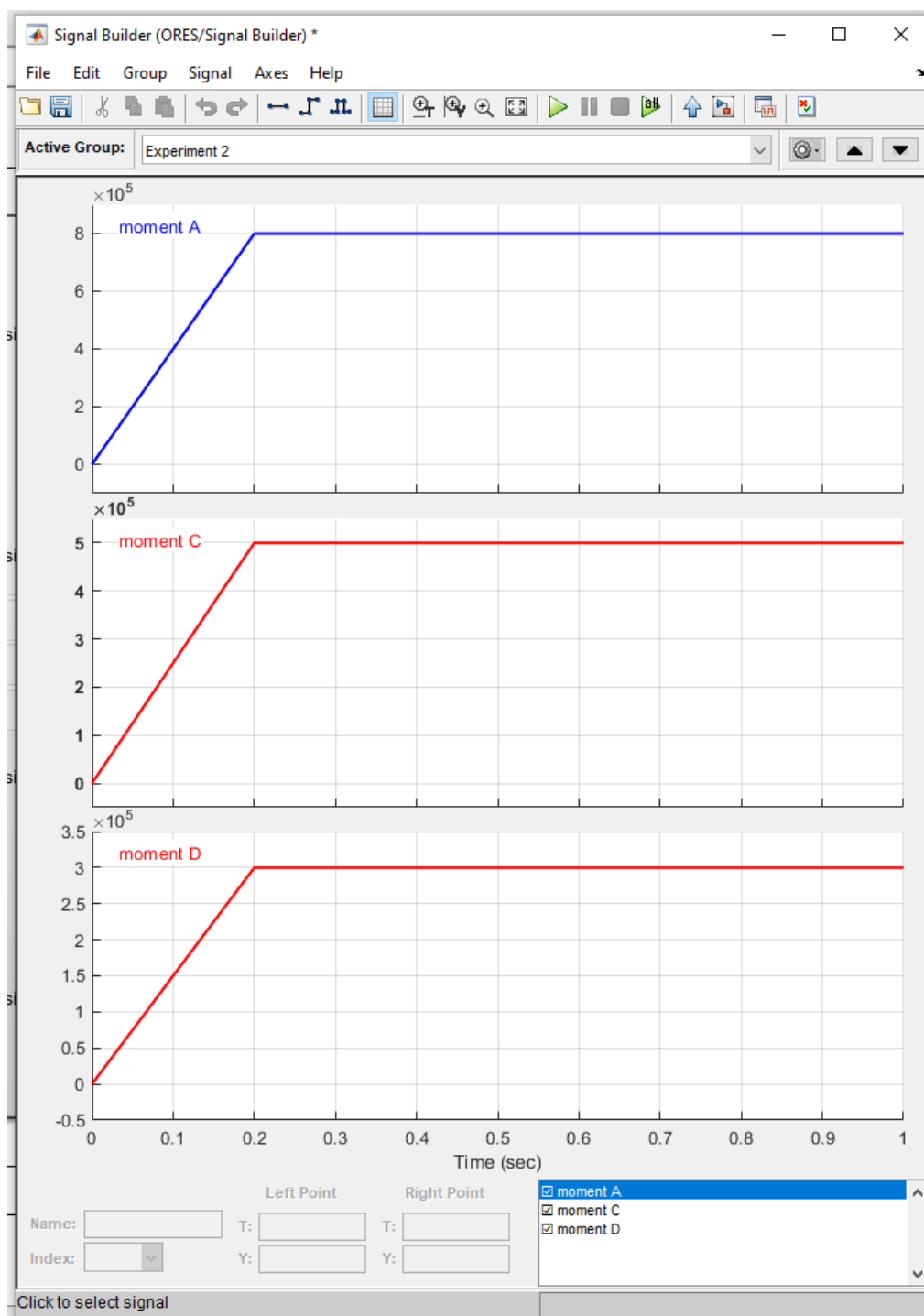


Рисунок 8. Эксперимент 2: сигналы $M_A(t)$, $M_C(t)$, $M_D(t)$

Результаты второго эксперимента показали наличие едва заметных крутильных колебаний на всех трех участках электропривода (рис. 9).



Рисунок 9. Эксперимент 2: осциллограммы $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$, $M_{BD}(t)$

Получены графические результаты третьего эксперимента, когда внешние моменты M_A , M_C , M_D были заданы (построены вручную по точкам) приблизительно как экспоненциальные функции времени t (рис. 10).

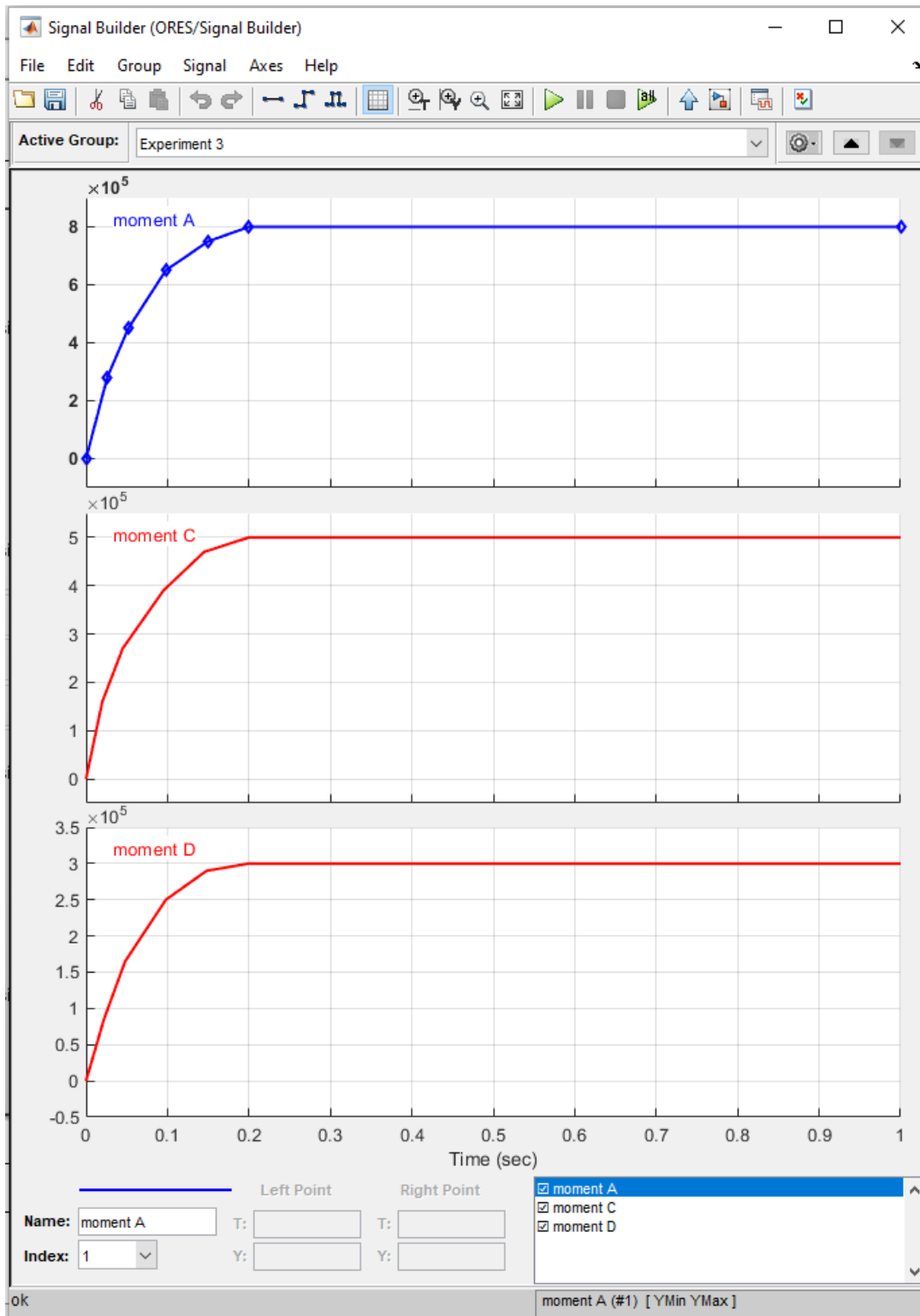


Рисунок 10. Эксперимент 3: сигналы $M_A(t)$, $M_C(t)$, $M_D(t)$

Результаты третьего эксперимента показали увеличение амплитуд крутильных колебаний на всех трех участках электропривода (рис. 11, 12).



Рисунок 11. Эксперимент 3: осциллограммы $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$, $M_{BD}(t)$

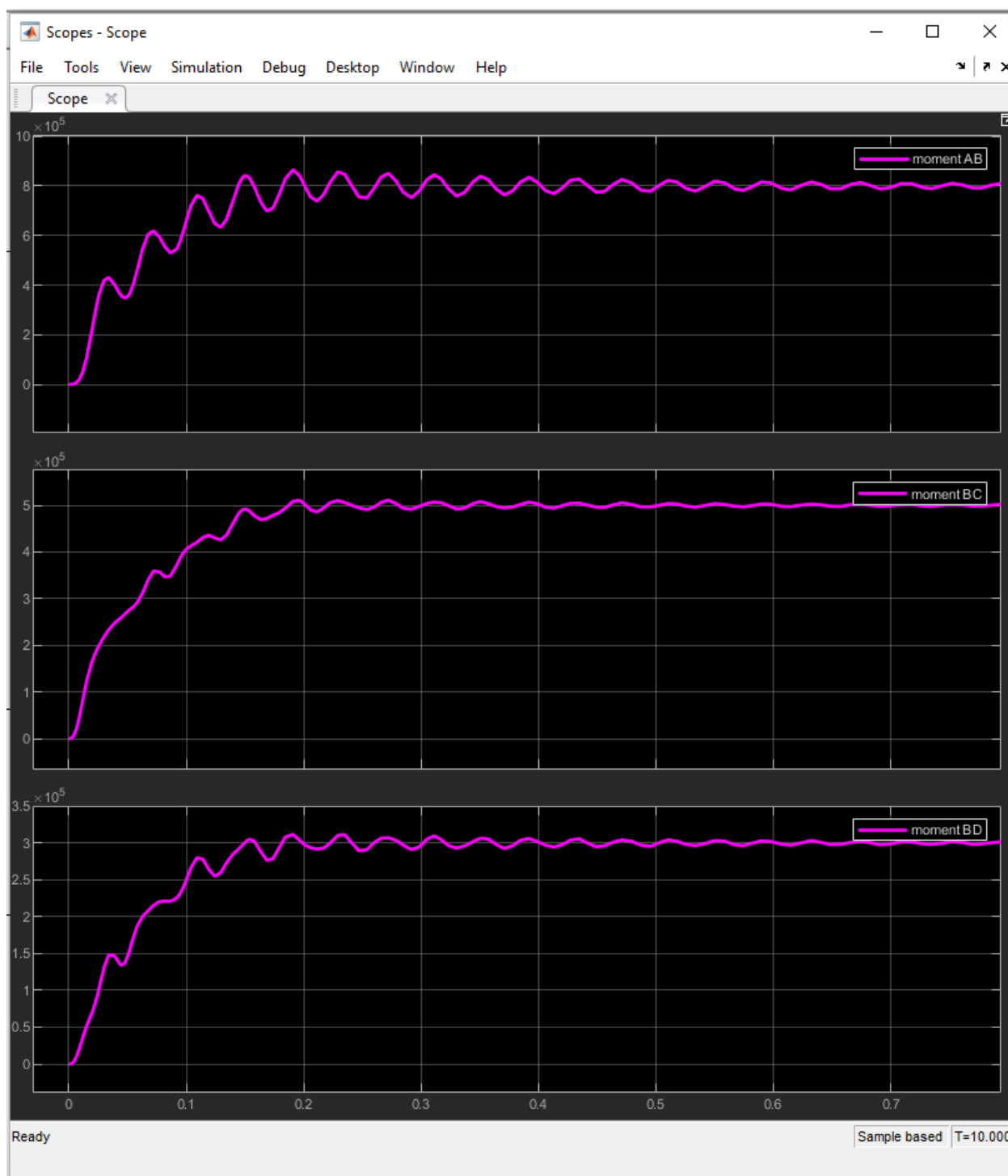


Рисунок 12. Эксперимент 3: осциллограммы $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$, $M_{BD}(t)$
(с масштабированием оси времени)

Заключение.

Выделение подсистем «Subsystem 1» и «Subsystem 2» не только сделало блочную крутильно-колебательную модель электропривода более наглядной, но и открыло широкие перспективы построения гораздо более сложных электромеханических колебательных моделей в среде Simulink.

Проделанные в среде Simulink три эксперимента послужат основой для написания учебно-методического пособия к выполнению ориентировочного динамического расчета электропривода рабочих валков прокатного стана в рамках лабораторных работ или домашнего задания по дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования».

Список литературы.

1. 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>
2. Мальцев А.А. Оптимизация параметров Simulink-модели электропривода прокатного стана по критерию минимизации длительности переходного процесса. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №8. С.67–81. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-8-2021/a230367>
3. Мальцев А.А. Параметрическая оптимизация Simulink-модели электропривода прокатного стана по критерию минимизации динамических нагрузок. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №9. С.127–141. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-9-2021/a230390>
4. Мальцев А.А. Оптимизация Simulink-модели электропривода рабочих валков прокатного стана дуо-160. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №10. С.86–98. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-10-2021/a230406>
5. Мальцев А.А. Структурная оптимизация крутильно-колебательной модели электропривода дуо-160. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №11. С.233–242. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-11-2021/a230448>

References.

1. 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>.
2. Andrey A. Maltsev. 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. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.8. P.67–81. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-8-2021/a230367>
3. Andrey A. Maltsev. Parameter optimization of the electric drive Simulink model of a rolling mill according to the criterion of minimizing the dynamic loads. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.9. P.127–141. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-9-2021/a230390>

4. Andrey A. Maltsev. Optimization of Simulink-model of working rolls electric drive of the duo-160 rolling mill. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.10. P.86–98. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-10-2021/a230406>
5. Andrey A. Maltsev. Torsional-oscillatory model structural optimization of duo-160 electric drive. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No 11. P.233–242. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-11-2021/a230448>