

УДК 621.771

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Приведен сравнительный анализ существующих экспериментальных и теоретических методов исследования крутильных колебаний в групповом электроприводе рабочих валков прокатного стана. Выявлены преимущества и намечены пути совершенствования метода имитационного компьютерного моделирования крутильных колебаний в программной среде Multisim.

Ключевые слова: электропривод, крутильные колебания, моделирование.

**IMPROVING THE METHODS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF TORSIONAL
VIBRATIONS IN AN ELECTRIC DRIVE****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 departments;
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

A comparative analysis of existing experimental and theoretical methods for studying torsional vibrations in a group electric drive of rolling mill working rolls is presented. The advantages are revealed and ways to improve the method of computer simulation of torsional vibrations in the Multisim software environment are outlined.

Keywords: electric drive, torsional vibrations, modeling.

Введение

Цель научного исследования – достоверное и всестороннее изучение крутильных колебаний в электроприводе на основе существующих методов познания, а также внедрение в учебный процесс полезных результатов.

Объект исследования – электропривод рабочих валков прокатного стана [1], в трансмиссии которого возникают крутильные колебания (рис. 1).

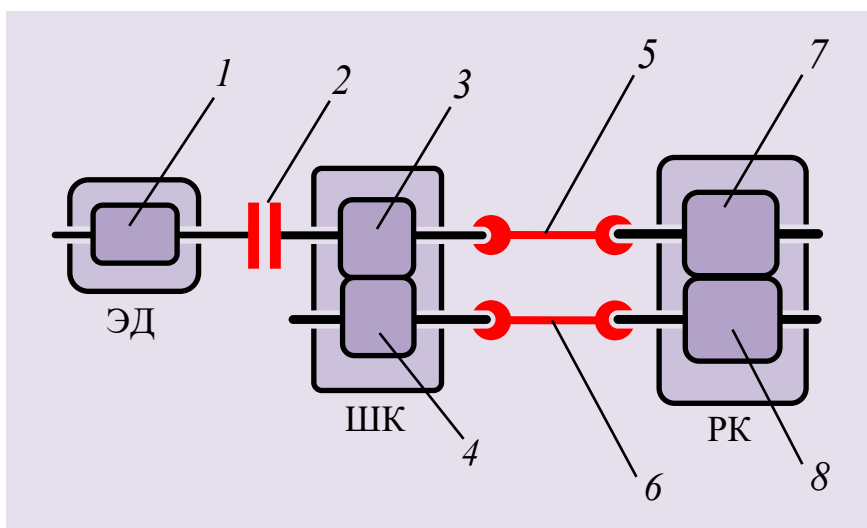


Рис. 1. Кинематическая схема электропривода:

ЭД – электродвигатель;

ШК – шестеренная клетка;

РК – рабочая клетка;

1 – ротор электродвигателя;

2 – упругая муфта;

3 – верхний шестеренный валок;

4 – нижний шестеренный валок;

5 – верхний шпиндель;

6 – нижний шпиндель;

7 – верхний рабочий валок;

8 – нижний рабочий валок

Главная причина возникновения крутильных колебаний – удар при захвате переднего конца заготовки рабочими валками в самом начале процесса прокатки. Неравномерность вращения ротора электродвигателя увеличивает динамические нагрузки в трансмиссии электропривода.

Крутильные колебания усиливают износ узлов электропривода и могут привести к усталостному разрушению деталей, оказывают негативное влияние на технологический процесс прокатки и качество выпускаемой продукции.

Электротензометрический метод

В настоящее время наиболее удобным и часто используемым методом экспериментального исследования крутильных колебаний в электроприводе является электротензометрический метод [2] (рис. 2).

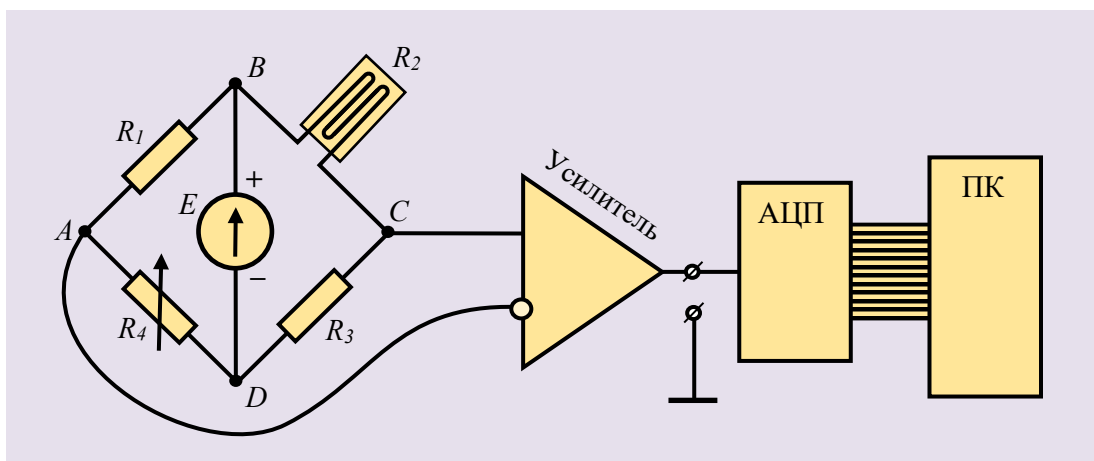


Рисунок 2. Электротензометрическая аппаратура:

ABCD – мост Уитстона;

AC – измерительная диагональ моста;

BD – диагональ питания моста;

E – источник питания;

R1, R3 – электрические сопротивления;

R2 – тензорезистор;

R4 – потенциометр;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ПК – персональный компьютер

Принцип работы электротензометрической аппаратуры заключается в том, что незначительная деформация растяжения-сжатия тензорезистора R2, наклеенного на валу электропривода, приводит к возникновению полезного сигнала (электрического тока в измерительной диагонали AC), причем сам мост Уитстона перед проведением эксперимента обязательно балансируется вращением рукоятки реохорда (потенциометр R4).

Вывод: на этапе конструирования и расчета нового электропривода отсутствует возможность проведения на нем электротензометрического эксперимента, что явно показывает актуальность поиска альтернативных методов исследования динамических нагрузок.

Метод физического моделирования

Это экспериментальный метод, основанный на построении физической крутильно-колебательной модели электропривода – лабораторного макета в виде жестких массивных дисков, соединенных между собой упругими валами (рис. 3).

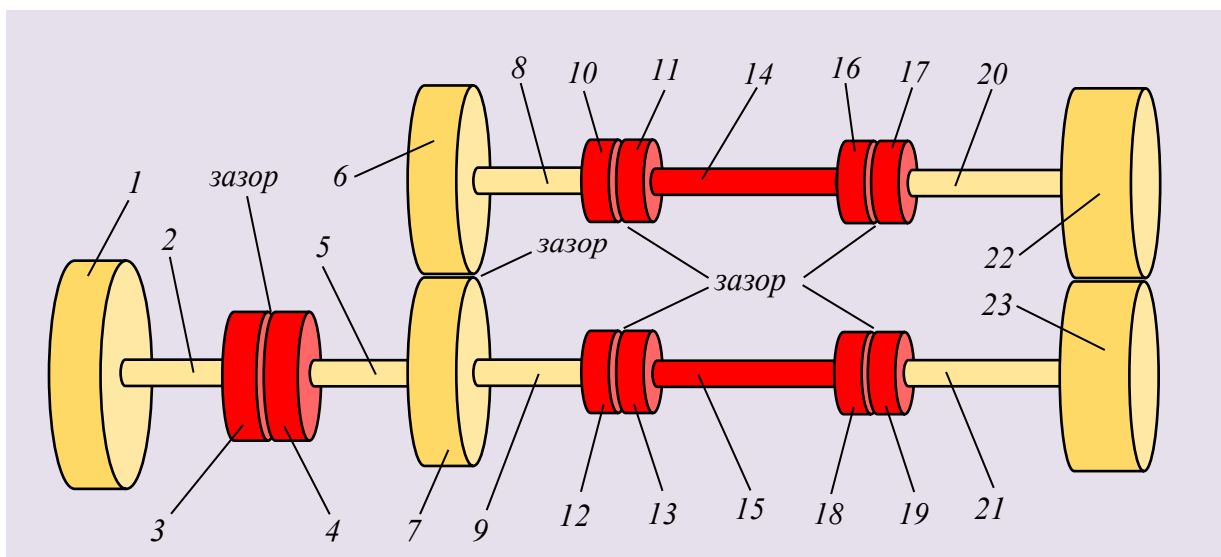


Рисунок 3. Физическая модель (макет) электропривода:

1, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 22, 23 – диски;

2, 5, 8, 9, 14, 15, 20, 21 – валы

Позиция 1 (диск) – сердечник ротора электродвигателя.

Позиция 2 (вал) – выходной вал электродвигателя.

Позиция 3 (диск) – полумуфта упругой муфты.

Позиция 4 (диск) – полумуфта упругой муфты.

Позиция 5 (вал) – приводной конец нижнего шестеренного вала.

Позиция 6 (диск) – венец верхнего шестеренного вала.

Позиция 7 (диск) – венец нижнего шестеренного вала.

Позиция 8 (вал) – выходной конец верхнего шестеренного вала.

Позиция 9 (вал) – выходной конец нижнего шестеренного вала.

Позиция 10 (диск) – полумуфта верхнего шпинделя.

Позиция 11 (диск) – полумуфта верхнего шпинделя.

Позиция 12 (диск) – полумуфта нижнего шпинделя.

Позиция 13 (диск) – полумуфта нижнего шпинделя.

Позиция 14 (вал) – вал верхнего шпинделя.

Позиция 15 (вал) – вал нижнего шпинделя.

Позиция 16 (диск) – полумуфта верхнего шпинделя.

Позиция 17 (диск) – полумуфта верхнего шпинделя.

Позиция 18 (диск) – полумуфта нижнего шпинделя.

Позиция 19 (диск) – полумуфта нижнего шпинделя.

Позиция 20 (вал) – приводной конец верхнего рабочего вала.

Позиция 21 (вал) – приводной конец нижнего рабочего вала.

Позиция 22 (диск) – бочка верхнего рабочего вала.

Позиция 23 (диск) – бочка нижнего рабочего вала.

Осевые моменты инерции дисков и крутильные жесткости валов модели идентифицируются по чертежам деталей и узлов электропривода или по каталожным данным.

Вывод: недостаток метода физического моделирования состоит в том, что потребуются дополнительные временные, трудовые и финансовые затраты на изготовление лабораторного макета электропривода.

Метод математического моделирования в среде MathCAD

Сущность метода математического моделирования состоит в том, что электропривод (оригинал) заменяется его математической моделью (рис. 4).

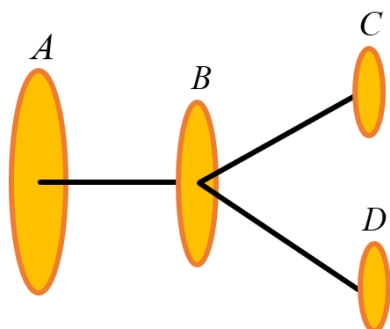


Рисунок 4. Расчетная схема электропривода:

A, B, C, D – жесткие массивные диски;
AB, BC, BD – невесомые упругие связи

Электропривод является объектом макромира, поэтому его крутильно-колебательная модель строится на принципах классической ньютоновской механики: вводится Лагранжиан как разность кинетической и потенциальной энергий механической системы:

$$L = T - U . \quad (1)$$

Далее на основании (1) записываются дифференциальные уравнения Лагранжа 2 рода в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_A} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_A} + \frac{\partial U}{\partial \varphi_A} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_A} = M_A ; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_B} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_B} + \frac{\partial U}{\partial \varphi_B} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_B} = 0 ; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_C} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_C} + \frac{\partial U}{\partial \varphi_C} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_C} = -M_C ; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_D} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_D} + \frac{\partial U}{\partial \varphi_D} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_D} = -M_D . \end{cases} \quad (2)$$

где

t – время;

T – кинетическая энергия крутильно-колебательной системы;

U – потенциальная энергия крутильно-колебательной системы;

R – работа сил рассеивания (диссипативная функция Релея);

φ_A – угловая координата диска A;

φ_B – угловая координата диска B;

φ_C – угловая координата диска C;

φ_D – угловая координата диска D;

ω_A – угловая скорость диска A;

ω_B – угловая скорость диска B;

ω_C – угловая скорость диска C;

ω_D – угловая скорость диска D;

M_A – приложенный к диску A внешний крутящий момент;

M_C – приложенный к диску C внешний крутящий момент;

M_D – приложенный к диску D внешний крутящий момент.

Кинетическая энергия крутильно-колебательной системы

$$T = \frac{J_A \omega_A^2}{2} + \frac{J_B \omega_B^2}{2} + \frac{J_C \omega_C^2}{2} + \frac{J_D \omega_D^2}{2}. \quad (3)$$

Потенциальная энергия крутильно-колебательной системы

$$U = \frac{C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B)^2}{2} + \frac{C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C)^2}{2} + \frac{C_{BD}(\varphi_B - \varphi_D)^2}{2}. \quad (4)$$

Работа сил рассеивания (диссипация)

$$R = \frac{\beta_{AB}(\omega_A - \omega_B)^2}{2} + \frac{\beta_{BC}(\omega_B - \omega_C)^2}{2} + \frac{\beta_{BD}(\omega_B - \omega_D)^2}{2}. \quad (5)$$

Инерционные моменты

$$M_{TA} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_A} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_A} = J_A \varepsilon_A; \quad (6)$$

$$M_{TB} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_B} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_B} = J_B \varepsilon_B; \quad (7)$$

$$M_{TC} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_C} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_C} = J_C \varepsilon_C; \quad (8)$$

$$M_{TD} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_D} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_D} = J_D \varepsilon_D. \quad (9)$$

Потенциальные моменты

$$M_{UA} = C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B); \quad (10)$$

$$M_{UB} = -C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B) + C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C) + C_{BD}(\varphi_B - \varphi_D); \quad (11)$$

$$M_{UC} = -C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C); \quad (12)$$

$$M_{UD} = -C_{BD}(\varphi_B - \varphi_D). \quad (13)$$

Диссипативные моменты

$$M_{RA} = \beta_{AB}(\omega_A - \omega_B); \quad (14)$$

$$M_{RB} = -\beta_{AB}(\omega_A - \omega_B) + \beta_{BC}(\omega_B - \omega_C) + \beta_{BD}(\omega_B - \omega_D); \quad (15)$$

$$M_{RC} = -\beta_{BC}(\omega_B - \omega_C); \quad (16)$$

$$M_{RD} = -\beta_{BD}(\omega_B - \omega_D). \quad (17)$$

Упругие моменты невесомых связей

$$M_{AB}(t) = C_{AB}(\varphi_A - \varphi_B) + \beta_{AB}(\omega_A - \omega_B); \quad (18)$$

$$M_{BC}(t) = C_{BC}(\varphi_B - \varphi_C) + \beta_{BC}(\omega_B - \omega_C); \quad (19)$$

$$M_{BD}(t) = C_{BD}(\varphi_B - \varphi_D) + \beta_{BD}(\omega_B - \omega_D). \quad (20)$$

Математическая крутильно-колебательная модель электропривода

$$\left\{ \begin{array}{l} J_A \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} + M_{AB}(t) = M_A; \\ J_B \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} - M_{AB}(t) + M_{BC}(t) + M_{BD}(t) = 0; \\ J_C \frac{d^2 \varphi_C(t)}{dt^2} - M_{BC}(t) = -M_C; \\ J_D \frac{d^2 \varphi_D(t)}{dt^2} - M_{BD}(t) = -M_D. \end{array} \right. \quad (21)$$

Уравнения (21) с учетом (18), (19) и (20) могут быть решены в среде MathCAD с использованием вычислительного блока Given / Odesolve или при помощи встроенных функций Rkadapt (метод Рунге-Кутты с настраиваемым шагом) и Rkfixed (метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом).

Вывод: метод математического моделирования в среде MathCAD не требует затрат на изготовление макета (физической модели) электропривода, затрат на приобретение фирменной электротензометрической аппаратуры; он открывает неограниченную возможность многократного варьирования в широком диапазоне любого параметра модели. Недостатком этого метода являются слишком громоздкий математический аппарат и, как следствие, частые ошибки в программировании.

Метод имитационного моделирования в среде Multisim

Недостатков предыдущих методов лишен метод имитационного моделирования, в основе которого лежит аналогия между механическими и электрическими величинами (табл. 1), позволяющая заменить исследование крутильно-колебательных процессов в механической системе на исследование колебаний в электрической цепи [3].

Таблица 1. Электромеханическая аналогия

Механическая система	Электрическая цепь
Осевые моменты инерции – индуктивности	
J_A [кг · м ²]	L_A [Гн]
J_B [кг · м ²]	L_B [Гн]
J_C [кг · м ²]	L_C [Гн]
J_D [кг · м ²]	L_D [Гн]
Крутильные жесткости (податливости) – емкости	
$\frac{1}{C_{AB}}$ $\left[\frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right]$	C_{AB} [Ф]
$\frac{1}{C_{BC}}$ $\left[\frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right]$	C_{BC} [Ф]
$\frac{1}{C_{BD}}$ $\left[\frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right]$	C_{BD} [Ф]
Коэффициенты демпфирования – сопротивления	
β_{AB} [Н · м · с/рад]	R_{AB} [Ом]
β_{BC} [Н · м · с/рад]	R_{BC} [Ом]
β_{BD} [Н · м · с/рад]	R_{BD} [Ом]
Внешние моменты – напряжения	
M_A [Н · м]	u_A [В]
M_C [Н · м]	u_C [В]
M_D [Н · м]	u_D [В]

Намечены пути совершенствования компьютерной модели путем учета в программной среде Multisim люфтов в невесомых упругих связях АВ, ВС, ВD и характера захвата прокатываемой заготовки рабочими валками (рис. 5).

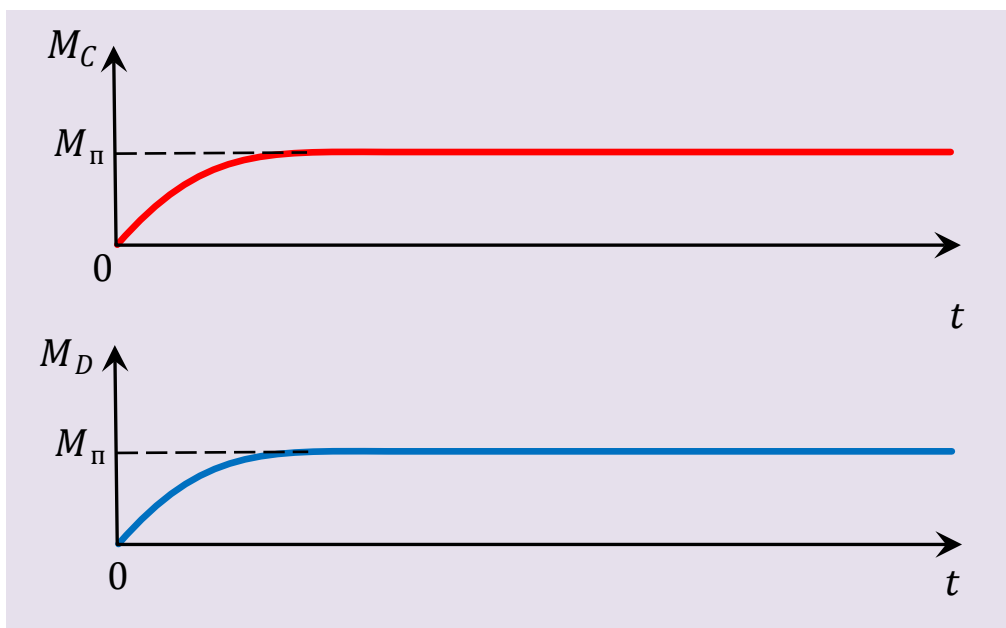


Рисунок 5. Зависимости моментов M_C и M_D от времени t :
 $M_П$ – момент прокатки (на один валок)

Заключение: на этапе конструирования и расчета нового прокатного стана (в рамках научно-исследовательской работы студентов, курсового или дипломного проектирования) одним из наиболее востребованных методов теоретического исследования динамических нагрузок, действующих на детали электропривода, будет метод имитационного моделирования крутильных колебаний, основанный на электромеханической аналогии и разрабатываемый автором в программной среде Multisim в настоящее время.

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. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с.
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебное пособие. – СПб: Изд-во "Лань", 2009. – 592 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. Shushkevich V.A. Fundamentals of electrotensiometry. – Minsk: Higher School, 1975. – 352 p.
3. Atabekov G.I. Theoretical foundations of electrical engineering. Linear electrical circuits: a textbook. – St. Petersburg: Publishing house "Doe", 2009. – 592 p.