

УДК 621.3

**К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ КРУТИЛЬНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

На примере прокатного стана дуо-260 показаны особенности построения разветвленной крутильно-колебательной модели привода рабочих валков для научного исследования нагружения шпинделей крутящим моментом.

Ключевые слова: электродвигатель, прокатный стан, электротехника.

**ON THE ISSUE OF CONSTRUCTING A TORSIONAL-OSCILLATORY
MODEL OF AN ELECTRIC DRIVE****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

Using the example of the duo-260 rolling mill, the features of constructing an extensive torsional-oscillatory model of the drive of working rolls for the scientific study of torque loading of spindles are shown.

Keywords: electric motor, rolling mill, electrical engineering.

Прокатный стан дуо-260 известен тем, что на нем студенты кафедры «Оборудование и технологии прокатки», осваивающие специальность «Проектирование технологических машин и комплексов», выполняют свои лабораторные работы (рис. 1).

| Техническая характеристика лабораторного стана 260 | | | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| I. Общие сведения | | | | | | |
| 1. Назначение стана | Горячий и холодный прокат | | | | | |
| 2. Тип стана | Дуо | | | | | |
| 3. Реверсивность | Да | | | | | |
| 4. Максимальная ширина проката | 250 мм | | | | | |
| 5. Скорость прокатки | 0,2 м/с | | | | | |
| II. Привод | | | | | | |
| 1. Электродвигатель | Трёхфазный асинхронный | | | | | |
| а) тип | 5AM280S8eУ3 | | | | | |
| б) мощность | Техническая характеристика лабораторного стана 260 | | | | | |
| в) число оборотов | 740 об/мин | | | | | |
| г) реверсивность | Да | | | | | |
| д) регулируемость числа оборотов | Да | | | | | |
| 2. Ременная передача | Многоручьевая | | | | | |
| а) передаточное число | 2,73 | | | | | |
| 3. Редуктор | | | | | | |
| а) тип | Цилиндрический косозубый | | | | | |
| б) число ступеней | Одноступенчатый | | | | | |
| в) передаточное число | 5,42 | | | | | |
| 4. Шестеренная клеть | Находится в одном корпусе с редуктором | | | | | |
| 5. Шпиндели | Универсальные | | | | | |
| III. Рабочая клеть | | | | | | |
| 1. Станина | | | | | | |
| а) тип | Закрытая | | | | | |
| б) материал | Железобетон | | | | | |
| 2. Рабочие валки | | | | | | |
| а) материал | Сталь 40Х | | | | | |
| б) диаметр валков | 260 мм | | | | | |
| в) длина бочки валков | 250 мм | | | | | |
| г) подшипники | Роликовые конические однорядные 7226А ГОСТ 27365-87 | | | | | |
| 3. Нажимное устройство | Гидравлическое | | | | | |
| 4. Устройство уравнивания | Винт-гайка и траверса | | | | | |
| Возможные варианты установки верхнего валка | | | | | | |
| Опора* | 1+2+5 | 1+2+6 | 1+3+5 | 1+3+6 | 1+4+5 | 1+4+6 |
| Расстояние между станиной и валком, мм | 91 | 96 | 115 | 120 | 125 | 130 |
| Диапазон раствора валков, мм | 29÷54 | 24÷49 | 5÷30 | 0÷25 | 0÷20 | 0÷15 |

Рисунок 1. Техническая характеристика стана дуо-260

Подвижные части электрической машины (ротор трехфазного асинхронного электродвигателя), механической передачи (многоручьевая ременная передача, шестерня и зубчатое колесо одноступенчатого редуктора, валки шестеренной клетки, универсальные шпиндели) и исполнительного механизма (рабочие валки) составляют механическую часть электропривода (МЧЭ) рабочих валков прокатного стана дуо-260 [1].

Объект научного исследования — электропривод, который приводит во вращение рабочие валки (технологический инструмент) прокатного стана дуо-260 (рис. 2).

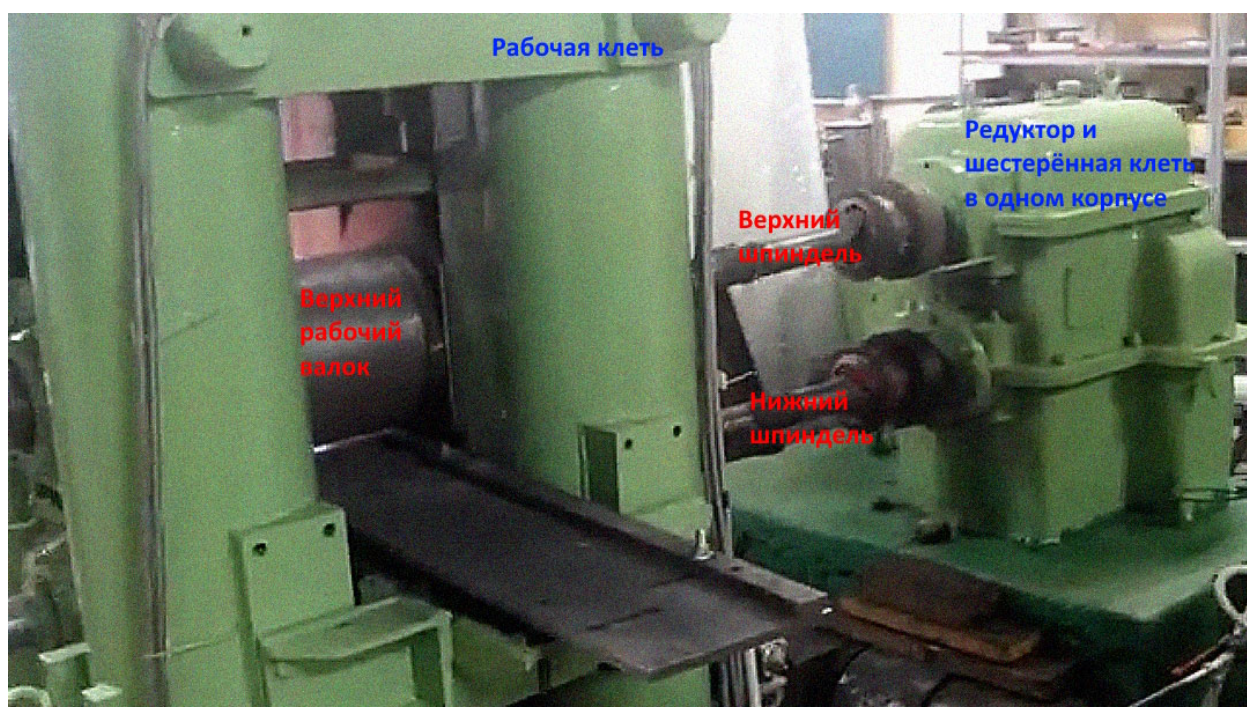


Рисунок 2. Электропривод рабочей клетки стана дуо-260

Требуется разработать алгоритм обучения студентов навыку построения разветвленной крутильно-колебательной модели группового привода рабочих валков от асинхронного электродвигателя, что актуально для дальнейшего проведения научного исследования нагружения универсальных шпинделей крутящим моментом.

Первый пункт алгоритма – по фотографиям прокатного стана дуо-260, эскизам и чертежам его деталей и узлов изобразить кинематическую схему электропривода рабочей клетки (рис. 3).

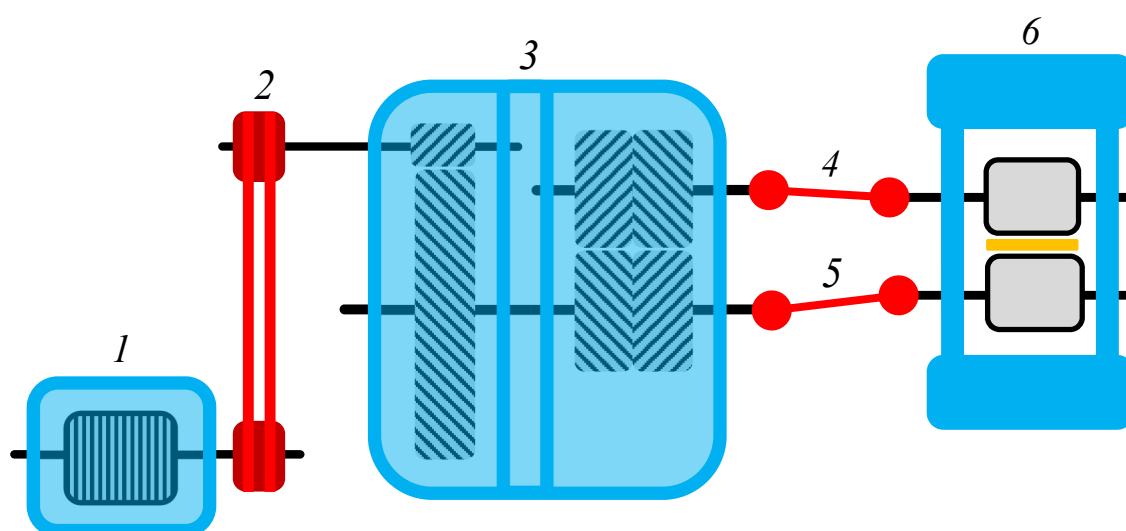


Рисунок 3. Кинематическая схема электропривода:

- 1 – асинхронный электродвигатель;
- 2 – многоруцьевая ременная передача;
- 3 – редуктор и шестеренная клетка;
- 4 – верхний универсальный шпиндель;
- 5 – нижний универсальный шпиндель;

6 – рабочая клеть с рабочими валками

На кинематической схеме желательно показать все вращающиеся части электропривода, в том числе внутренний ротор электродвигателя, шестерню и зубчатое колесо одноступенчатого косозубого цилиндрического редуктора, а также шестеренные валки шестеренной клетки, находящейся в одном корпусе с редуктором, что упростит построение крутильно-колебательной модели.

Второй пункт алгоритма – составить разветвленную расчетную схему: масса А – ротор электродвигателя, ременная передача, шестерня и зубчатое колесо редуктора, верхний и нижний шестеренные валки шестеренной клетки; масса В – верхний рабочий валок; масса С – нижний рабочий валок; связь АВ – верхний шпиндель; связь АС – нижний шпиндель (рис. 4).

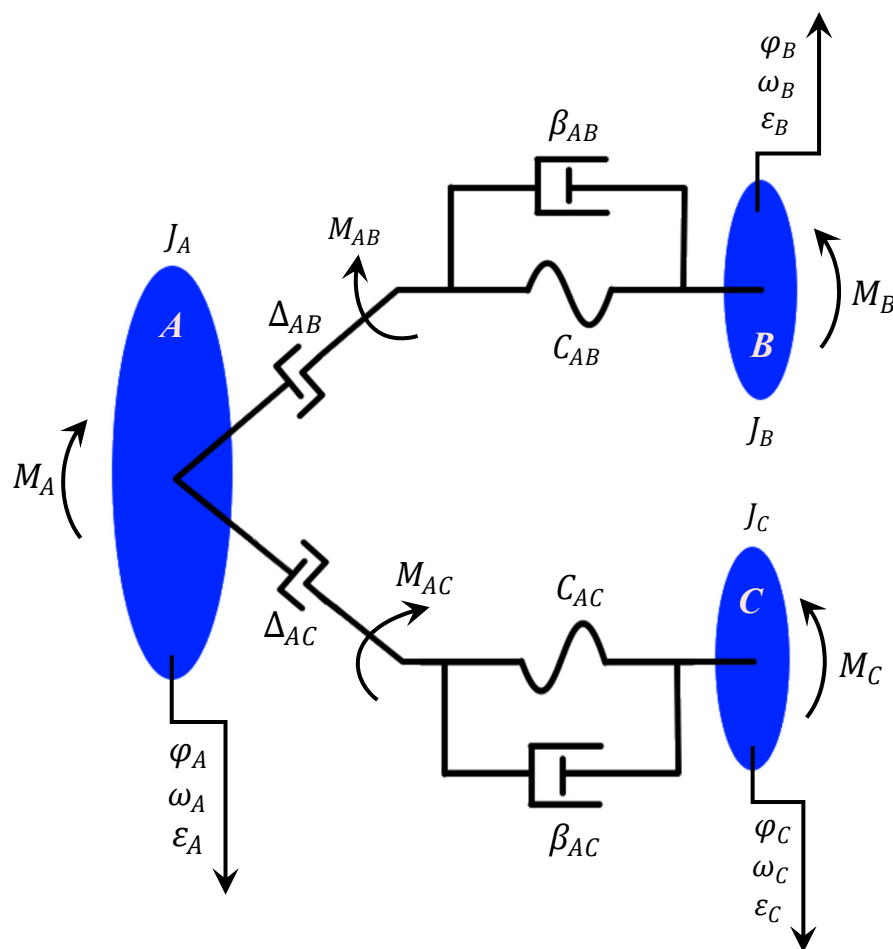


Рисунок 4. Физическая модель привода:
А, В, С – массы, представленные в виде дисков

Третий пункт алгоритма – идентифицировать инерционные (моменты инерции дисков), упругие (жесткости связей) и другие параметры физической модели электропривода, кроме неизвестных угловых координат, скоростей и ускорений дисков, с целью построения графиков моментов в связях (табл. 1).

Таблица 1. Параметры физической модели электропривода

| Параметр | Обозначение | Размерность |
|----------------------------|-------------|-------------|
| Угловая координата диска А | φ_A | рад |

| | | |
|-------------------------------|-----------------|---------------------|
| Угловая координата диска В | φ_B | рад |
| Угловая координата диска С | φ_C | рад |
| Угловая скорость диска А | ω_A | рад/с |
| Угловая скорость диска В | ω_B | рад/с |
| Угловая скорость диска С | ω_C | рад/с |
| Угловое ускорение диска А | ε_A | рад/с ² |
| Угловое ускорение диска В | ε_B | рад/с ² |
| Угловое ускорение диска С | ε_C | рад/с ² |
| Момент инерции диска А | J_A | кг · м ² |
| Момент инерции диска В | J_B | кг · м ² |
| Момент инерции диска С | J_C | кг · м ² |
| Жесткость связи АВ | C_{AB} | Н · м/рад |
| Жесткость связи АС | C_{AC} | Н · м/рад |
| Люфт в связи АВ | Δ_{AB} | рад |
| Люфт в связи АС | Δ_{AC} | рад |
| Демпфирование в связи АВ | β_{AB} | Н · м · с/рад |
| Демпфирование в связи АС | β_{AC} | Н · м · с/рад |
| Момент в связи АВ | M_{AB} | Н · м |
| Момент в связи АС | M_{AC} | Н · м |
| Момент, приложенный к диску А | M_A | Н · м |
| Момент, приложенный к диску В | M_B | Н · м |
| Момент, приложенный к диску С | M_C | Н · м |

Четвертый пункт алгоритма – построить математическую крутильно-колебательную модель электропривода.

Уравнение крутильно-колебательного движения диска А:

$$J_A \cdot \varepsilon_A(t) + M_{AB}(t) + M_{AC}(t) = M_A(t). \quad (1)$$

Уравнение крутильно-колебательного движения диска В:

$$J_B \cdot \varepsilon_B(t) - M_{AB}(t) = -M_B(t). \quad (2)$$

Уравнение крутильно-колебательного движения диска С:

$$J_C \cdot \varepsilon_C(t) - M_{AC}(t) = -M_C(t). \quad (3)$$

Если из уравнения (1) вычесть уравнение (2), то

$$\varepsilon_A(t) - \varepsilon_B(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_B(t)}{J_B}. \quad (4)$$

Если из уравнения (1) вычесть уравнение (3), то

$$\varepsilon_A(t) - \varepsilon_C(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AC}(t) - M_C(t)}{J_B}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) математическая модель приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_{AB}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_B(t)}{J_B} \\ \varepsilon_{AC}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t) - M_{AC}(t)}{J_A} - \frac{M_{AC}(t) - M_C(t)}{J_B} \end{cases} \quad (6)$$

Упругий момент связи АВ задан в виде кусочно-линейной функции угла закручивания этой связи (рис. 5):

$$M_{AB}(t) = \begin{cases} C_{AB} \left(\varphi_{AB}(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AB}(t) \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{AB}}{2} < \varphi_{AB}(t) < \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ C_{AB} \left(\varphi_{AB}(t) + \frac{\Delta_{AB}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AB}(t) \leq -\frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases}$$

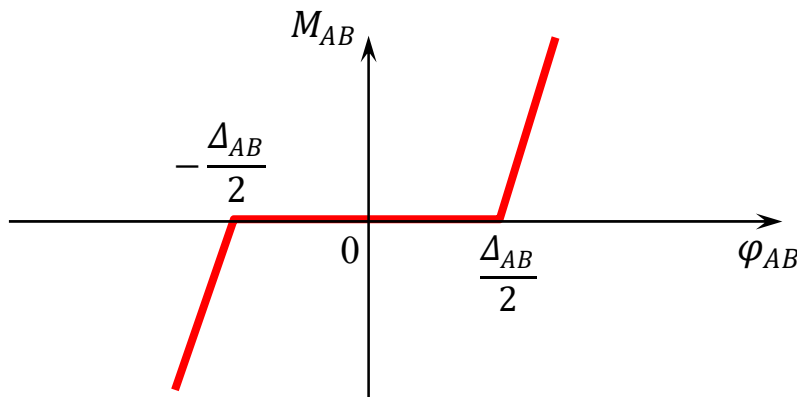


Рисунок 5. Люфт в упругой связи АВ

Упругодемпфирующий момент связи АВ:

$$M_{AB}(t) = \begin{cases} C_{AB} \left(\varphi_{AB}(t) - \frac{\Delta_{AB}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AB}(t)) \right) + \\ + \beta_{AB} \omega_{AB}(t), & \text{при } |\varphi_{AB}(t)| \geq \frac{\Delta_{AB}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{AB}(t)| < \frac{\Delta_{AB}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{AB}(t) &= \varphi_A(t) - \varphi_B(t) \\ \omega_{AB}(t) &= \omega_A(t) - \omega_B(t) \end{aligned}$$

Упругий момент связи АС задан в виде кусочно-линейной функции угла закручивания этой связи (рис. 6):

$$M_{AC}(t) = \begin{cases} C_{AC} \left(\varphi_{AC}(t) - \frac{\Delta_{AC}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AC}(t) \geq \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{AC}}{2} < \varphi_{AC}(t) < \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ C_{AC} \left(\varphi_{AC}(t) + \frac{\Delta_{AC}}{2} \right), & \text{при } \varphi_{AC}(t) \leq -\frac{\Delta_{AC}}{2} \end{cases}$$

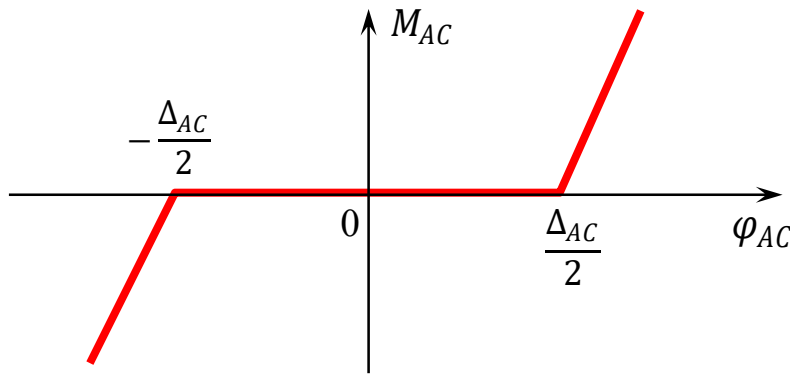


Рисунок 6. Люфт в упругой связи АС

Упругодемпфирующий момент связи АС:

$$M_{AC}(t) = \begin{cases} C_{AC} \left(\varphi_{AC}(t) - \frac{\Delta_{AC}}{2} \operatorname{sgn}(\varphi_{AC}(t)) \right) + \\ + \beta_{AC} \omega_{AC}(t), & \text{при } |\varphi_{AC}(t)| \geq \frac{\Delta_{AC}}{2} \\ 0, & \text{при } |\varphi_{AC}(t)| < \frac{\Delta_{AC}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\varphi_{AC}(t) = \varphi_A(t) - \varphi_C(t)$$

$$\omega_{AC}(t) = \omega_A(t) - \omega_C(t)$$

Начальные условия – нулевые:

$$\varphi_{AB}(0) = \varphi_{AC}(0) = 0$$

$$\omega_{AB}(0) = \omega_{AC}(0) = 0$$

$$\varepsilon_{AB}(0) = \varepsilon_{AC}(0) = 0$$

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

$$M_A(0) = M_B(0) = M_C(0) = 0$$

В случае асимметричной прокатки ($M_B \neq M_C$):

$$M_B(t) = \begin{cases} \frac{K_B M_{уст} t}{T_{зах}} & \text{при } t < T_{зах} \\ K_B M_{п} & \text{при } t \geq T_{зах} \end{cases} \quad (9)$$

$$M_C(t) = \begin{cases} \frac{K_C M_{уст} t}{T_{зах}} & \text{при } t < T_{зах} \\ K_C M_{п} & \text{при } t \geq T_{зах} \end{cases} \quad (10)$$

где K_B и K_C – коэффициенты, задающие неравномерность распределения момента прокатки $M_{п}$ на оба рабочих валка ($K_B + K_C = 1$); $M_{уст}$ [Н·м] – установившийся момент прокатки; $T_{зах}$ [с] – продолжительность захвата заготовки рабочими валками.

В математической модели (6), (7), (8), (9), (10) отсутствует выражение для вычисления момента, приложенного к диску А, поэтому студентам будет необходимо предварительно изучить конструкцию и, возможно, построить механическую характеристику электродвигателя.

Пятый пункт алгоритма – расшифровать маркировку, указанную на металлической паспортной табличке (шильдике), прикрепленной к корпусу электродвигателя (рис. 5).

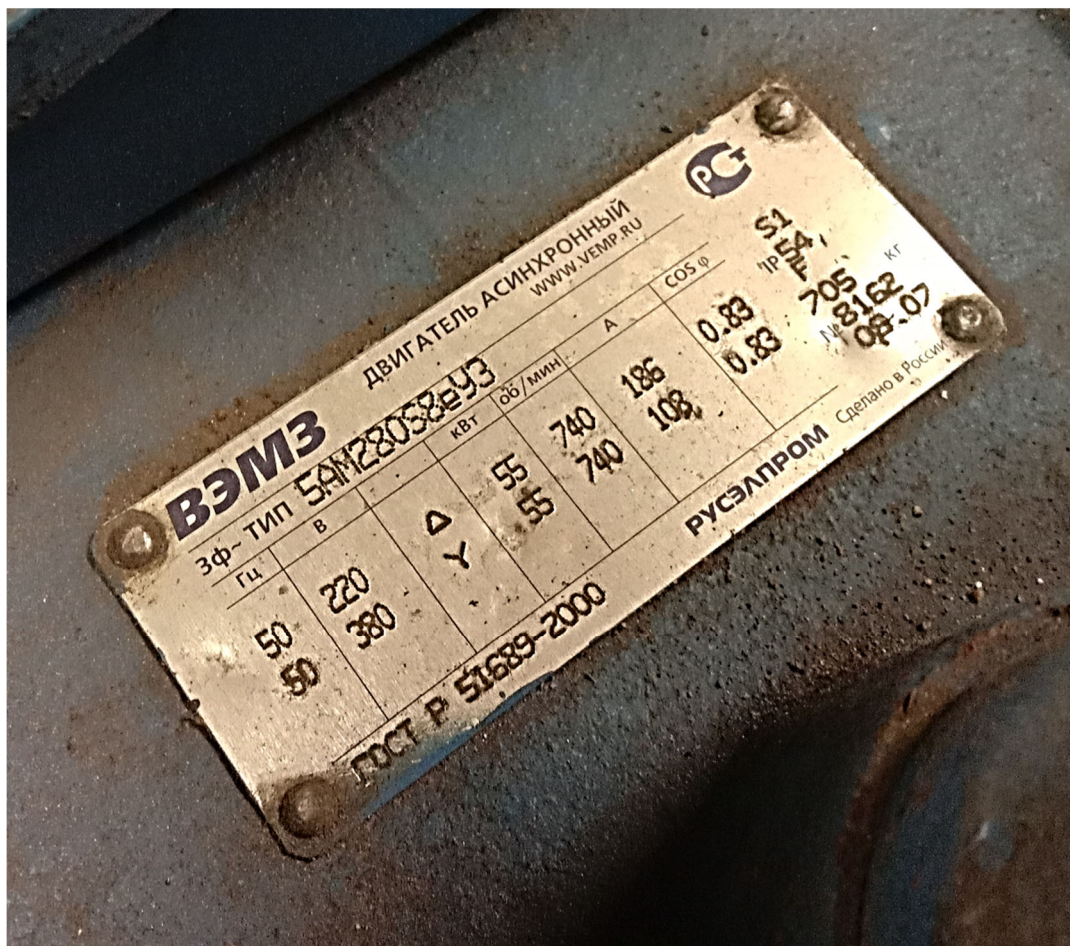


Рисунок 5. Шильдик электродвигателя

Производитель – Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ). Он входит в состав Российского электротехнического концерна «Русэлпром», который объединяет ряд крупных электромашиностроительных предприятий России (<https://vemp.ru/>).

Тип электродвигателя – 5AM280S8eY3:

5 – порядковый номер серии.

A – электродвигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором.

M – модернизированный.

280 – высота оси вращения в мм.

S – условное обозначение длины сердечника статора.

8 – число полюсов.

Y – исполнение электродвигателя для района с умеренным климатом.

3 – категория размещения электродвигателя в помещениях без регулируемых климатических условий.

Номинальная полезная, она же механическая, она же отдаваемая работающему прокатному стану, мощность электродвигателя

$$P_{2H} = 55 \text{ кВт}.$$

Номинальная частота вращения вала электродвигателя

$$n_H = 740 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Номинальный вращающий момент

$$M_H = \frac{9,55 \cdot P_{2H}}{n_H} = \frac{9,55 \cdot 55\,000}{740} \approx 710 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кратность максимального момента (<https://agregat.me/>)

$$\lambda_k = \frac{M_{max}}{M_H} = 2.$$

Максимальный вращающий момент

$$M_{max} = 2 M_H = 2 \cdot 710 = 1\,420 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Частота питающей сети

$$f_1 = 50 \text{ Гц}.$$

Число пар полюсов электродвигателя

$$p = 4.$$

Трехфазная обмотка статора состоит из трех идентичных частей – фаз, каждая из которых представляет собой систему из последовательно соединенных проводников, размещенных на каждом полюсном делении в нескольких рядом лежащих пазах. Класс изоляции трехфазной обмотки статора – F (максимальная температура 150°C).

Обмотка короткозамкнутого ротора выполнена в виде «беличьей» клетки, образованной расположенными в пазах ротора медными или алюминиевыми стержнями, замкнутыми накоротко с двух сторон кольцами из того же материала. Ротор асинхронного электродвигателя помещен внутри статора и зафиксирован с помощью боковых подшипниковых щитов.

Концы обмотки статора присоединены к зажимам, расположенным в коробке выводов, укрепленной на корпусе электродвигателя. Выведены все шесть концов трехфазной обмотки статора, что позволяет использовать электродвигатель при напряжениях сети 380 и 220 В, отличающихся в $\sqrt{3}$ раз.

После подключения фазных обмоток статора к трехфазному источнику питания в них потечет ток, создающий магнитный поток, угловая скорость вращения которого

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{4} = 78,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Частота вращения магнитного поля в асинхронном электродвигателе

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Номинальное скольжение составляет примерно 1% :

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{750 - 740}{750} \approx 0,013.$$

Критическое скольжение составляет примерно 5% :

$$s_{кр} = s_H \left(\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1} \right) = 0,013 \cdot \left(2 + \sqrt{2^2 - 1} \right) \approx 0,049.$$

Таким образом, по приведенным паспортным данным студенты смогут самостоятельно построить механическую характеристику асинхронного электродвигателя типа 5AM280S8eУ3, пользуясь методическими указаниями [2], [3], [4].

Заключение

Разработан алгоритм обучения студентов кафедры «Оборудование и технологии прокатки» навыку построения разветвленной крутильно-колебательной модели группового привода рабочих валков от асинхронного электродвигателя. Студенты смогут использовать приобретенный ими навык для решения производственной задачи разработки новой схемы технологического процесса прокатки заготовки на стане дуо-260. Такая задача может быть поставлена перед учащимися в рамках конференции «Студенческая научная весна», а также в рамках курсового и дипломного проектирования.

Список литературы:

1. Красовский А.Б. Основы электропривода: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 405 с.

2. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к выполнению домашнего задания. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — 36 с.
3. Красовский А.Б., Васюков С.А., Мисеюк О.И., Трунин Ю.В. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Электротехника и электроника». — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 25 с.
4. Волченсков В.И. Исследование трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Электротехника и электроника». — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 41 с.

References:

1. Krasovsky A.B. Fundamentals of electric drive: a textbook. — Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2015. — 405 p.
2. Solovyov V.A. Calculation of the characteristics of a three-phase asynchronous motor: guidelines for homework. — Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2015. — 36 p.
3. Krasovsky A.B., Vasyukov S.A., Miseyuk O.I., Trunin Yu.V. Research of an asynchronous motor with a short-circuited rotor: methodological guidelines for laboratory work in the discipline "Electrical engineering and electronics". — Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. — 25 p.
4. Volchenskov V.I. Investigation of three-phase asynchronous motors with a phase rotor: guidelines for completing homework in the course "Electrical engineering and electronics". — Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2009. — 41 p.