

УДК 621.3

**НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА РОЛЬГАНГА****Мальцев Андрей Анатольевич,**доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана,  
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Статья посвящена методической разработке семинара для студентов, изучающих дисциплину «Основы научных исследований» по специальности «Электроэнергетика и электротехника» и специализации «Электропривод и автоматика».

**Ключевые слова:** электропривод, рольганг, математическая модель.

**SCIENTIFIC RESEARCH OF THE ROLLER ELECTRIC DRIVE MECHANICAL  
PART****Andrey A. Maltsev,**associate professor of BMSTU ФН-7 department,  
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

The article is devoted to the methodological development of a seminar for students studying the discipline "Fundamentals of scientific research" in the specialty "Electric Power engineering and electrical engineering" and specialization "Electric drive and automation"

**Keywords:** electric drive, roller shutter, mathematical model.

В соответствии с выполняемыми функциями, рольганги разделяют на следующие типы: рабочие, транспортные, пакетирующие, сбрасывающие, печные, подъемно-качающиеся, подъемно-опускающиеся, поворотные и передвижные [1].

Ролики рабочего рольганга воспринимают динамические нагрузки на протяжении всего периода прокатки слитка. Эти нагрузки, возникающие в основном при выходе металла из валков и при кантовке проката, имеют наибольшие значения после первых пропусков, когда металл еще не вытянут в длину и удар воспринимается двумя роликами [2].

Дополнительное сопротивление движению металла возникает еще и вследствие того, что ролики рольганга не лежат на одном уровне. Если перепад в уровне роликов равен 1% от диаметра ролика, то дополнительное сопротивление составит 7% массы металла [3].

В качестве объекта исследования выбран электропривод рольганга прокатного стана (рис. 1).

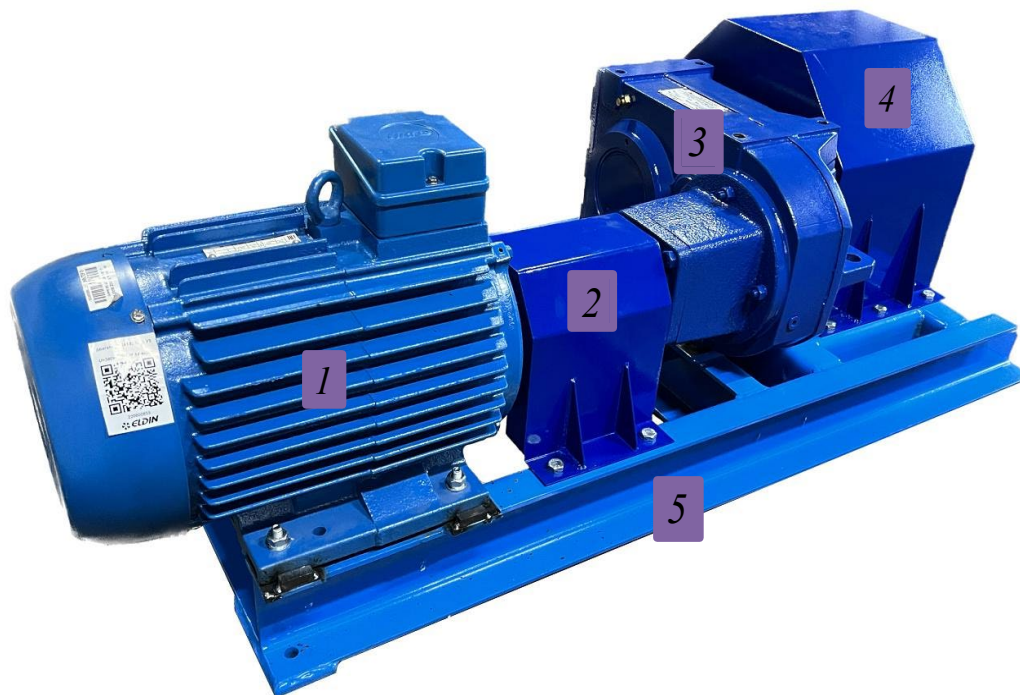


Рисунок 1. Электропривод конструкции НТЦ «Редуктор»:

<https://6-es.ru/informatsiya/novosti/privod-rolganga/>

1 – электродвигатель RA132MA6Y3;

2 – муфта моторная;

3 – редуктор 6Ц2В-77ES;

4 – муфта коренная;

5 – рама

Вал электродвигателя вращается с частотой 960 об/мин, а выходной вал редуктора совершает 55 об/мин, поэтому расчетное передаточное число редуктора 6Ц2В-77ES

$$U_{6Ц2В-77ES} = \frac{960}{55} \approx 17,45 .$$

Однако, фактическое передаточное число редуктора

$$U_{6Ц2В-77ES} = 17,49 .$$

С целью исследования крутильных колебаний [4] составлена цепная 3-массовая расчетная схема механической части электропривода (рис. 2).

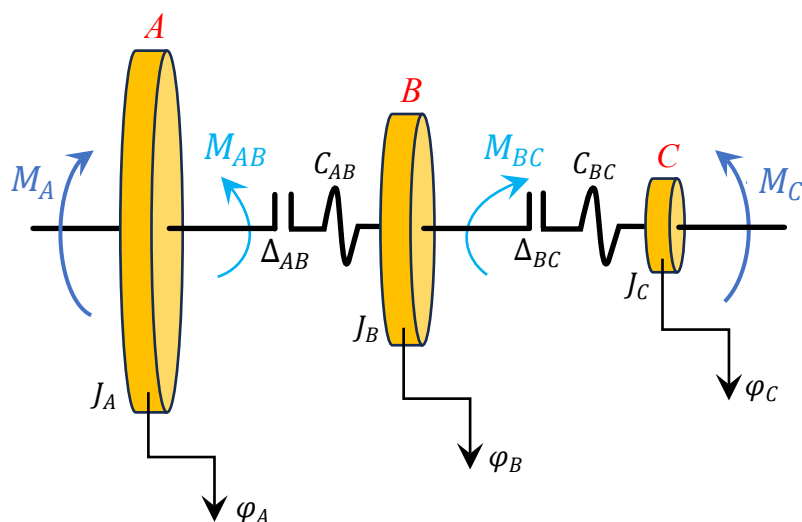


Рис. 2. Расчетная схема электропривода:

диск А – первая масса;

диск В – вторая масса;

диск С – третья масса

Момент инерции диска А равен суммарному осевому моменту инерции ротора электродвигателя RA132MA6Y3 и моторной муфты:

$$J_A = J_{\text{RA132MA6Y3}} + J_{\text{муф. мот.}}$$

Момент инерции диска В равен суммарному осевому моменту инерции зубчатой передачи редуктора 6Ц2В-77ES, с учетом приведения шестерней и зубчатых колес к выходному валу электродвигателя:

$$J_B = J_{6Ц2В-77ES}$$

Момент инерции диска С равен сумме приведенного осевого момента инерции эластомерной коренной муфты Rexnord Viva и приведенного осевого момента инерции ролика рольганга:

$$J_C = \frac{J_{\text{Rexnord Viva}}}{U_{6Ц2В-77ES}^2} + \frac{J_{\text{рол}}}{U_{6Ц2В-77ES}^2}$$

Податливость связи АВ равна сумме податливости выходного вала электродвигателя RA132MA6Y3, податливости моторной муфты и податливости входного вала редуктора 6Ц2В-77ES:

$$e_{AB} = e_{\text{RA132MA6Y3}} + e_{\text{муф. мот.}} + e_{6Ц2В-77ES \text{ вход}}$$

Жесткость связи АВ – величина, обратная ее податливости:

$$C_{AB} = \frac{1}{e_{AB}}$$

Податливость связи ВС равна сумме податливости выходного вала редуктора 6Ц2В-77ES, податливости коренной муфты Rexnord Viva и податливости приводного конца ролика рольганга:

$$e_{BC} = e_{6Ц2В-77ES \text{ выход}} + e_{\text{Rexnord Viva}} + e_{\text{рол}}$$

Жесткость связи ВС – величина, обратная ее податливости:

$$C_{BC} = \frac{1}{e_{BC}}$$

Построена следующая математическая крутильно-колебательная модель электропривода [5, 6]:

$$\begin{aligned} J_A \cdot \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} + M_{AB}(t) &= M_A(t) \\ J_B \cdot \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} - M_{AB}(t) + M_{BC}(t) &= 0 \\ J_C \cdot \frac{d^2 \varphi_C(t)}{dt^2} - M_{BC}(t) &= -M_C(t) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} &= \frac{M_A(t) - M_{AB}(t)}{J_A} \\ \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} &= \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} \\ \frac{d^2 \varphi_C(t)}{dt^2} &= \frac{M_{BC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} - \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} &= \frac{M_A(t) - M_{AB}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} \\ \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} - \frac{d^2 \varphi_C(t)}{dt^2} &= \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} - \frac{M_{BC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \varphi_{AB}(t)}{dt^2} &= \frac{M_A(t) - M_{AB}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} \\ \frac{d^2 \varphi_{BC}(t)}{dt^2} &= \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t)}{J_B} - \frac{M_{BC}(t) - M_C(t)}{J_C} \end{aligned}$$

Угол закручивания [рад] связи АВ:

$$\varphi_{AB}(t) = \varphi_A(t) - \varphi_B(t).$$

Угол закручивания [рад] связи ВС:

$$\varphi_{BC}(t) = \varphi_B(t) - \varphi_C(t).$$

Скорость закручивания [рад/с] связи АВ:

$$\omega_{AB}(t) = \frac{d}{dt} \varphi_A(t) - \frac{d}{dt} \varphi_B(t).$$

Скорость закручивания [рад/с] связи ВС:

$$\omega_{BC}(t) = \frac{d}{dt} \varphi_B(t) - \frac{d}{dt} \varphi_C(t).$$

Упругодемпфирующий момент [Н·м] связи АВ:

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

Упругодемпфирующий момент [Н·м] связи ВС:

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

Математическая постановка задачи: требуется найти неизвестные параметры крутильно-колебательной модели – углы закручивания связей (табл. 1).

Таблица 1. Искомые параметры

Углы закручивания	Обозначение	Размерность
Связь АВ	$\varphi_{AB}(t)$	рад
Связь ВС	$\varphi_{BC}(t)$	рад

Кроме того, необходимо идентифицировать все оставшиеся параметры математической модели (табл. 2, 3, 4, 5).

Таблица 2. Инерционные параметры

Осевые моменты инерции	Обозначение	Размерность
Диск А	$J_A$	кг · м <sup>2</sup>
Диск В	$J_B$	кг · м <sup>2</sup>
Диск С	$J_C$	кг · м <sup>2</sup>

Таблица 3. Упругие параметры

Жесткости	Обозначение	Размерность
Связь АВ	$C_{AB}$	Н · м/рад
Связь ВС	$C_{BC}$	Н · м/рад

Таблица 4. Зазоры в соединениях

Люфт в связи АВ	$\Delta_{AB}$	рад
Люфт в связи ВС	$\Delta_{BC}$	рад

Таблица 5. Параметры диссипации

Демпфирование в связи АВ	$\beta_{AB}$	Н · м · с/рад
Демпфирование в связи ВС	$\beta_{BC}$	Н · м · с/рад

Математическая постановка задачи значительно упрощается, если при незначительных зазорах не учитывать крутильные колебания и считать связи АВ и ВС абсолютно жесткими [7]. Такое допущение дает возможность перейти к эквивалентной расчетной схеме механической части электропривода – так называемому приведенному механическому звену (рис. 3).

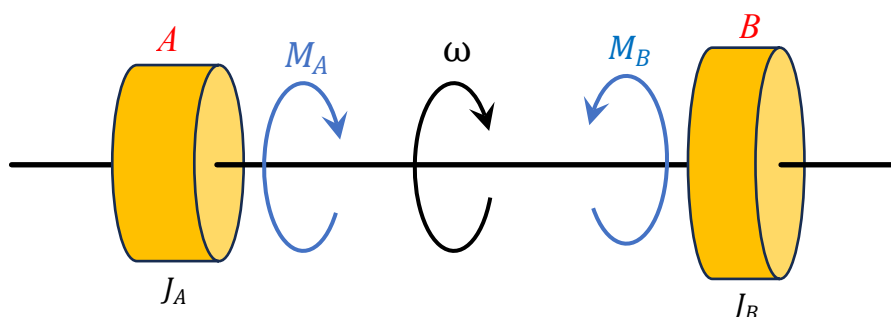


Рис. 3. Приведенное механическое звено:

диск А – ротор электродвигателя;

диск В – приведенный суммарный момент инерции трансмиссии

К приведенной механической системе приложено два момента – момент  $M_A(t)$ , развиваемый электродвигателем RA132MA6У3, и момент сопротивления  $M_B(t)$ , связанный

с сопротивлением движению металла по рольгангу. Каждый из этих моментов может как совпадать по направлению с направлением скорости  $\omega$ , так и быть противоположно направленным.

Приведенный суммарный осевой момент инерции

$$J_{\Sigma} = J_A + J_B = J_{\text{РА132МА6У3}} + J_{\text{муф.мот}} + J_{\text{6Ц2В-77ES}} + \frac{J_{\text{Rexnord Viva}}}{U_{\text{6Ц2В-77ES}}^2} + \frac{J_{\text{рол}}}{U_{\text{6Ц2В-77ES}}^2}.$$

Уравнение движения приведенного механического звена имеет вид

$$J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = M_A(t) - M_B(t).$$

В установившемся режиме электропривод рольганга работает со скоростью  $\omega = \text{const}$ . Вывести электропривод из этого состояния может либо изменение нагрузки  $M_B(t)$ , либо изменение момента электродвигателя  $M_A(t)$ . Поэтому для проведения научного исследования необходимо построить механическую характеристику РА132МА6У3 – трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором [8] (рис. 4).



Рисунок 4. Электродвигатель РА132МА6У3 конструкции

АО «Ярославский электромашиностроительный завод»:

<https://electrodvigatel.org/elektrodvigateli/evropejskij-din-standart/ra/electrodvigatel-ra-132ma6-4x960-im1081b3-lapy-eldin>

Заключение: подобран материал для проведения семинара на тему «Научное исследование механической части электропривода» со студентами, изучающими дисциплину «Основы научных исследований» специальности «Электроэнергетика и электротехника» и специализации «Электропривод и автоматика».

#### Список литературы:

1. Глазков В.С. Машины непрерывного транспортирования для прокатных станов. — Москва: Металлургия, 1979. — 248 с.
2. Петров И.Н., Пальмов Е.В. Исследование удара прокатываемой полосы о ролики рабочего рольганга // Известия вузов. Черная металлургия. — 1958. — №9. — С. 115-121.

3. Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглик А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. – Москва: Машиностроение, 1973. – 213 с.
4. Ивин С.М., Хакимов А.Г. Крутильные колебания: методические указания к выполнению курсового задания по дисциплине «Теоретическая механика». – Уфа: УАИ, 1987. – 23 с.
5. Мальцев А.А., Филатов А.А. Исследование крутильно-колебательных процессов в приводе клетки №9 НЗС 900/700/500 методом компьютерного моделирования // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Том 22, №5. С. 216–220.
6. Мальцев А.А., Филатов А.А. Оценка уровня крутильных колебаний в приводе клетки № 5 непрерывного широкополосного стана 2000 методом компьютерного моделирования // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Том 22, №9. С. 417–425.
7. Красовский А.Б. Основы электропривода: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 405 с.
8. 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.

#### References:

1. Glazkov V.S. Continuous transportation machines for rolling mills. – Moscow: Metallurgy, 1979. – 248 p.
2. Petrov I.N., Palmov E.V. Investigation of the impact of the rolled strip on the rollers of the working roller. Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy. – 1958. – No. 9. – pp. 115-121.
3. Ivanovsky K.E., Rakovshchik A.N., Tsoglik A.N. Roller and disc conveyors and devices. – Moscow: Mashinostroenie, 1973. – 213 p.
4. Ivin S.M., Khakimov A.G. Torsional vibrations: methodological guidelines for completing a course assignment in the discipline "Theoretical Mechanics". Ufa: UAI, 1987. – 23 p.
5. Maltsev A.A., Filatov A.A. Investigation of torsional-oscillatory processes in the drive of the cage No. 9 НЗС 900/700/500 by computer modeling // Procurement production in mechanical engineering. 2024. Volume 22, No. 5. pp. 216-220.
6. Maltsev A.A., Filatov A.A. Assessment of the level of torsional vibrations in the drive of the cage No. 5 of the continuous broadband mill 2000 by the method of computer modeling // Procurement production in mechanical engineering. 2024. Volume 22, No. 9. pp. 417-425.
7. Krasovsky A.B. Fundamentals of electric drive: a textbook. – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2015. – 405 p.
8. Krasovsky A.B., Vasyukov S.A., Misyuk 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.