

## Разработка алгоритма корректировки скорости с целью снижения износа роликов трайб-аппарата на основании данных о натяжении металла

*Д.А. Полещенко, К.О. Рукавицын*

*Старооскольский технологический институт, Старый Оскол*

**Аннотация:** В статье рассмотрены проблемы износа роликов трайб-аппарата, связанных с рассогласованием скоростей в режиме сопровождения материала. Существующие методы борьбы с износом борются со следствием проблемы, а не с причиной. Одним из способов снижения интенсивности износа бочек роликов является разработка метода, позволяющего скорректировать скорость электродвигателя трайб-аппарата с целью уменьшения рассогласования скоростей между рабочей поверхностью ролика и заготовки, учитывая существующие технологические требования по созданию тянущих и тормозящих усилий. Предложен алгоритм расчёта корректировки скорости на основании натяжения металла, компенсирующий износ ролика и снижающий силу трения. Моделирование системы с разработанным алгоритмом показало устранение рассогласования скоростей во время сопровождения материала, а, следовательно, она позволит снизить интенсивность износа роликов.

**Ключевые слова:** система корректировки скорости, трайб-аппарат, износ роликов, натяжение металла, система управления, рассогласование скоростей, снижение силы трения.

### Описание проблемы и цели исследования

Во многом производительность линий стана, изготавливающей мелкосортный сортамент, зависит от участка смотки проката, состоящего из подающего, натяжного устройства (трайб-аппарата) и сматывающего устройства (моталки). Для создания натяжения необходимо, чтобы линейная скорость рабочей поверхности роликов трайб-аппарата была на 4–10 % больше линейной скорости проката.

Анализ литературных источников [1 – 3] показал, что:

1) При транспортировании головной и хвостовой частей проката обеспечивается создание натяжения за счёт задания рассогласования скоростей между бочкой ролика и транспортируемым материалом. При этом методики, позволяющие определить необходимое рассогласование,

отсутствуют, а значения разницы скоростей подбираются эмпирическим путём.

2) Во время сопровождения материала равенство линейной скорости заготовки и рабочей поверхности ролика не обеспечивается за счёт различных факторов.

Авторами [1] установлено, что:

1) Значительное рассогласование линейных скоростей движения заготовки и бочек роликов – одна из причин процесса интенсификации износа роликов.

2) При транспортировании головной части проката выполняется основное требование по созданию натяжения в заготовке за счёт превышения скорости роликов относительно скорости транспортируемого материала. При этом рассогласование скоростей зачастую оказывается избыточным.

В работах [1 – 3] отмечено, что одним из способов снижения интенсивности износа бочек роликов является разработка такого способа управления скоростным режимом агрегата, который обеспечил бы: уменьшение рассогласования скоростей рабочих поверхностей роликов и проката, сохраняя тянущие и тормозящие усилия в головной и хвостовой части заготовки соответственно; минимизацию сил трения между роликом и прокатом в режиме сопровождения. Существуют также методы нанесения на поверхность ролика упрочняющего слоя: лазерная наплавка [4], термическое напыление [5] и другие [6, 7], но они не устраняют первопричину возникновения ускоренного износа – рассогласование скоростей.

Целью данной работы является разработка системы управления электроприводом трайб-аппарата позволяющей скомпенсировать влияние износа рабочей поверхности ролика путём внедрения алгоритма корректировки задания на скорость в зависимости от косвенных измерений натяжения материала.

---

## Разработка математического алгоритма корректировки задания на скорость

При рассмотрении процесса намотки и введения корректировки задания на скорость, необходимо придерживаться допущений, указанных в [8].

Тогда натяжение металла можно рассчитать по формуле [9]:

$$F = k \int_0^t (v_2 - v_1) dt + F_0, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от физических свойств, линейных размеров и температуры транспортируемого материала, Н/м;  $v_2$  – скорость подающего механизма (последней клетки прокатного стана), м/с;  $v_1$  – линейная скорость рабочей поверхности ролика трайб-аппарата, м/с;  $F_0$  – начальное значение натяжения материала, Н.

По формуле (1) можно составить структурную схему для расчета натяжения материала (см. рисунок 1).

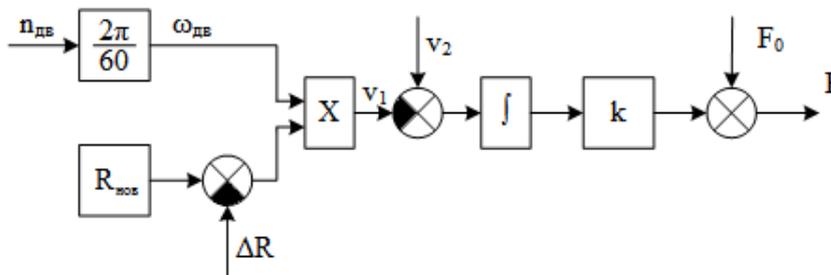


Рисунок 1. – Структурная схема расчета натяжения материала

Входом блока, вычисляющего натяжение материала, является частота вращения электродвигателя  $n_{дв}$  и линейная скорость проката на выходе последней клетки  $v_2$ , выходом – численное значение натяжения  $F$ . Вычисление натяжения начинается в момент времени, когда передняя часть проката будет захвачена трайб-аппаратом. Рассчитывается натяжение, исходя из линейной скорости ролика, изменяющейся во времени:  $R_{нов}$  – начальный радиус ролика,

$\Delta R$  - функция уменьшения радиуса ролика во времени (износ ролика). Разность линейных скоростей интегрируется по времени и умножается на коэффициент, учитывающий физические свойства проката  $k$ . Так как при расчете корректировки скорости трайб-аппарата существует необходимость в вычислении производной натяжения, то необходимость в вычислении начального натяжения ( $F_0$ ) отсутствует, т.к. данная величина будет обнулена при операции дифференцирования.

Для упрощения расчёта зависимости коэффициента трения от рассогласования скоростей  $\mu(\Delta v)$  принимаем следующие допущения: при равенстве линейных скоростей металла и рабочей поверхности ролика трайб-аппарата коэффициент трения минимален и принимает значение  $\mu=0,01$ ; максимальный коэффициент трения  $\mu=0,3$  соответствует рассогласованию скоростей  $\Delta v=0,25$  м/с; при  $\Delta v>0,25$  м/с возникает пробуксовка металла, и  $\mu=0,2$ .

Тогда уравнение, описывающее данную зависимость, примет вид:

$$\begin{cases} \mu(\Delta v) = 1,16 \cdot \Delta v + 0,01; \text{ при } \Delta v \leq 0,25 \text{ м/с} \\ \mu(\Delta v) = 0,2; \text{ при } \Delta v > 0,25 \text{ м/с} \end{cases} \quad (2)$$

Крутящий момент электропривода трайб-аппарата на валу  $M_{\text{дв}}$ , Н·м:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}} \pm M_{\text{дин}}; \quad (3)$$

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{тр1}} + M_{\text{тр2}} + M_{\text{приж}}. \quad (4)$$

где  $M_{\text{ст}}$  – соответственно момент, создаваемый силами трения в подшипниках ролика ( $M_{\text{тр1}}$ ) и трения качения и скольжения роликов о металл ( $M_{\text{тр2}}$ ) и момент, возникающий при прижиге верхнего холостого ролика ( $M_{\text{приж}}$ ), Н·м;  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, приведенный к валу двигателя, необходимый для преодоления инерции всех вращающихся от двигателя частей привода в период разгона (плюс) или замедления (минус), Н·м [10].

Компоненты  $M_{\text{тр1}}$  и  $M_{\text{приж}}$  не зависят от рассогласования скоростей между металлом и роликом, а  $M_{\text{тр2}}$  является функцией радиуса ролика и

рассогласования скоростей. Поэтому для достоверных результатов моделирования блока корректировки скорости трайб-аппарата необходимо в модели задать расчет данной компоненты нагрузки.

Момент трения качения и скольжения ролика о металл:

$$M_{\text{тр}2} = \frac{P_{\text{тяг}} \cdot \mu(\Delta v) \cdot R(t)}{i}; \quad (5)$$

где  $P_{\text{тяг}}$  – тяговое усилие ролика, Н;  $i=1$  – передаточное число привода трайб-аппарата;  $R(t)$  – радиус ролика в момент времени  $t$ , м.

Натяжение, на участке от клетки до моталки [4]:

$$F = \frac{M_{\text{мот}}(t) \cdot i_{\text{мот}}}{R_{\text{бунт}}(t)}; \quad (6)$$

где  $M_{\text{мот}}(t)$  – электромагнитный момент, развиваемый моталкой в момент времени  $t$ , Н·м;  $i_{\text{мот}}$  – передаточное число редуктора моталки;  $R_{\text{бунт}}(t)$  – радиус намотанного бунта в момент времени  $t$ , м.

Из формулы (1) следует, что линейная скорость бочки ролика трайб-аппарата:

$$v_1 = v_2 - \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt}; \quad (7)$$

Частота вращения двигателя трайб-аппарата:

$$n_1 = \left( v_2 - \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt} \right) \cdot \frac{60}{2\pi \cdot R(t)}; \quad (8)$$

Требуемая частота вращения двигателя в режиме сопровождения проката:

$$n_{\text{дв}}^* = \frac{60 \cdot v_2}{2\pi \cdot R(t)} = \frac{60 \cdot v_2}{2\pi \cdot \left( v_2 - \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt} \right)} = \frac{v_2 \cdot n_1}{v_2 - \frac{i_{\text{мот}}}{k} \cdot \frac{d \left( \frac{M_{\text{мот}}(t)}{R_{\text{бунт}}(t)} \right)}{dt}}; \quad (9)$$

На основании (9), а также зная частоту вращения электродвигателя трайб-аппарата, силу натяжения материала, рассчитываемую по значению электромагнитного момента, развиваемого приводом моталки и радиуса

намотанного бунта (определяется по показаниям датчика маятниковой трубы) можно составить структурную схему блока корректировки задания на скорость привода трайб-аппарата (рисунок 2). Также в структурную схему включен фильтр низких частот для исключения влияния высокочастотных помех при косвенном расчете натяжения металла.

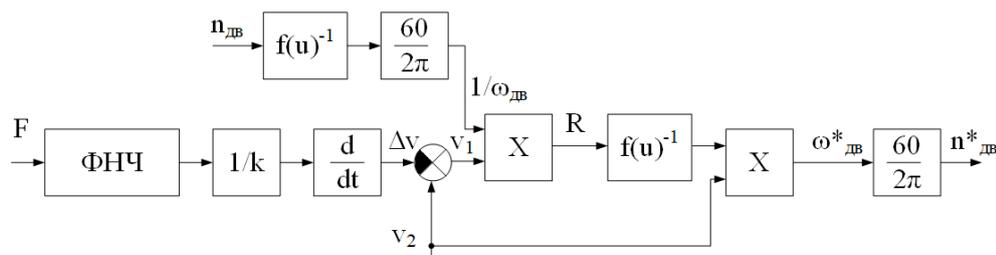


Рисунок 2. – Структурная схема расчета корректировки задания на скорость для трайб-аппарата в режиме сопровождения проката

### Построение имитационной модели

Оценку классической системы управления электроприводом трайб-аппарата и системы с корректировкой скорости по натяжению материала можно произвести методами имитационного моделирования в среде Simulink/Matlab (рисунок 3).

Система состоит из следующих блоков: *SpeedReference* – блок задания на скорость электропривода; *Speed Correct* – блок корректировки задания на скорость на основании натяжения (9); *Variable torque* – блок вычисления момента, создаваемого силами трения ролика о металл; *T-calculator* - блок расчета натяжения металла; также были; *Load Torque* – блок задания компонент нагрузки без учета момента, создаваемого силами трения ролика о металл; *DTC Induction Motor Drive* – блок подсистемы прямого управления моментом (рисунок 4), состоящей из блоков выпрямителя, звена постоянного тока, инвертора, блока, реализующего логику прямого управления моментом, регулятора скорости и асинхронного электродвигателя.

Система состоит из следующих блоков: *SpeedReference* – блок задания на скорость электропривода; *Speed Correct* – блок корректировки задания на скорость на основании натяжения (9); *Variable torque* – блок вычисления момента, создаваемого силами трения ролика о металл; *T-calculator* - блок расчета натяжения металла; также были; *Load Torque* – блок задания компонент нагрузки без учета момента, создаваемого силами трения ролика о металл; *DTC Induction Motor Drive* – блок подсистемы прямого управления моментом (рисунок 4), состоящей из блоков выпрямителя, звена постоянного тока, инвертора, блока, реализующего логику прямого управления моментом, регулятора скорости и асинхронного электродвигателя.

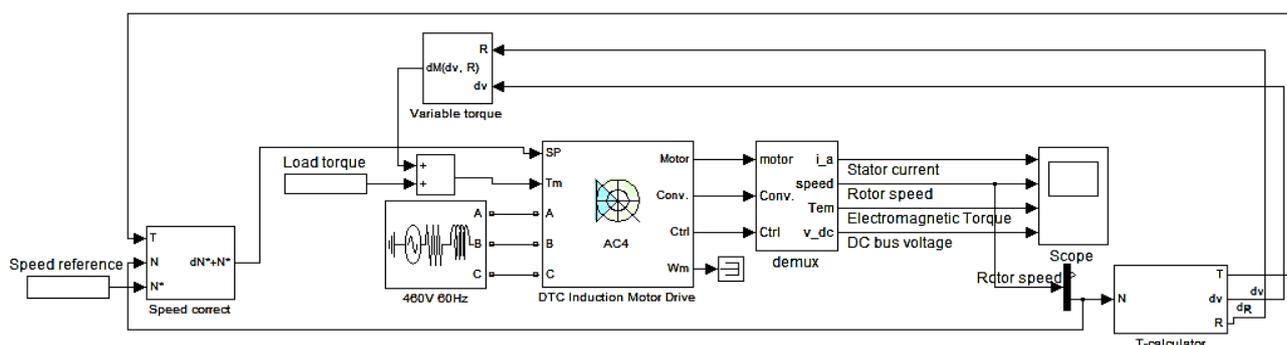


Рисунок 3. – Модель системы прямого управления моментом с блоком коррекции скорости по натяжению материала в приложении Simulink среды MatLab

Алгоритм работы системы прямого управления моментом состоит из следующих этапов:

- определяется электромагнитный момент, развиваемый асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и вектор потокосцепления статора;
- модуль вектора потокосцепления и электромагнитного момента сравнивается с заданными значениями, на основании чего формируются

сигналы ошибок по потокосцеплению и электромагнитному моменту при помощи релейных регуляторов;

- выбирается оптимальная комбинация состояний ключей инвертора преобразователя частоты, при которой вектор напряжения будет минимизировать сигналы ошибок.

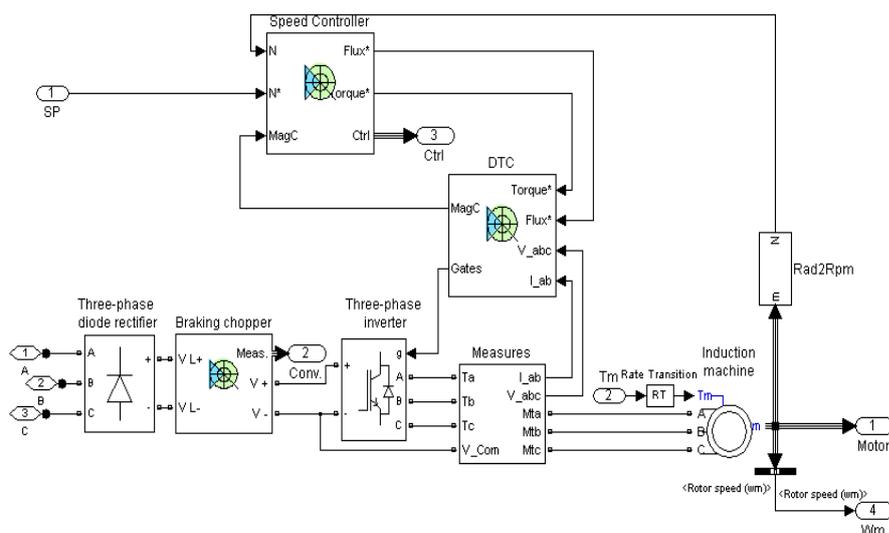


Рисунок 4. – Подсистема прямого управление моментом асинхронного привода

Таким образом, в результате работы системы модуль потокосцепления статора и электромагнитный момент будут постоянно находиться в зоне допустимого отклонения от заданного значения, определяемого величиной петли гистерезиса соответствующего регулятора. Выбор базового вектора напряжения производят с помощью таблицы переключений [11].

На основании [12, 13] были рассчитаны параметры электродвигателя трайб-аппарата для внесения соответствующих параметров в модель. Для электродвигателя M2CA 315SA расчетные характеристики, используемые в модели, представлены в таблице 1.

## Результаты моделирования системы

Для сокращения времени моделирования длительность реального технологического процесса была сокращена в 15 раз за счет:

- уменьшения времени холостого хода и останова;
- сокращение в 10 раз всех технологических операций.

Основные технологические операции, промоделированные в различных системах управления, представлены в таблице 2.

По результатам моделирования система без корректировки скорости по натяжению была получена временная зависимость рассогласования линейных скоростей металла и ролика трайб-аппарата (рисунок 5).

Видно, что во время транспортировки головной части и в режиме сопровождения подката, рассогласование скоростей увеличивается в положительную сторону. Этот факт вызван постепенным увеличением износа бочки ролика трайб-аппарата, что влечёт за собой постепенное снижение окружной скорости ролика.

Таблица 1. Расчетные характеристики модели электродвигателя

Наименование	Значение
Тип	M2CA 315SA
Выходная номинальная мощность $P_{2ном}$ , кВт	110
Номинальное напряжение $U_{ном}$ , В	400
Номинальная скорость $n_2$ , об/мин	1487
Число пар полюсов $p$	2
КПД при 100% нагрузке $\eta_{ном}$ , %	95,4
КПД при 75% нагрузке $\eta_{0.75}$ , %	95,1
Коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$	0,85
Номинальный ток $I_{ном}$ , А	198
Кратность пускового тока $K_i$	6,9
Номинальный крутящий момент $M_{ном}$ , Н·м	706
Отношение пускового момента к номинальному $K_{п}$	2,1
Отношение критического момента к номинальному $K_{макс}$	2,8
Момент инерции $J$ , кг·м <sup>2</sup>	2

Наименование	Значение
Активное сопротивление статора, Ом	0,021
Активное сопротивление роторам, Ом	0,012
Индуктивность статора и ротора, Гн	0,01
Индуктивность цепи намагничивания, Гн	0,024

Таблица 2. Время моделирования основных технологических операций

Технологическая операция	Время моделирования
Разгон до скорости холостого хода	0–0,1
Работа на холостом ходу	0,2 –2,5
Разгон до скорости транспортировки головной части проката	2,5–3
Начало транспортировки металла. Прижим металла верхним роликом	3,2 – 5
Поднятие верхнего ролика трайб-аппарата. Режим сопровождения проката	5 – 11,5
Транспортировка хвостовой части	11,5 – 12,5
Прижим верхним роликом металла	12,1 – 12,3
Торможения до скорости холостого хода	12 – 12,5
Работа на холостом ходу	12,5 – 14
Остановка двигателя	14 – 14,2
Привод трайб-аппарата не работает	14,1 – 15

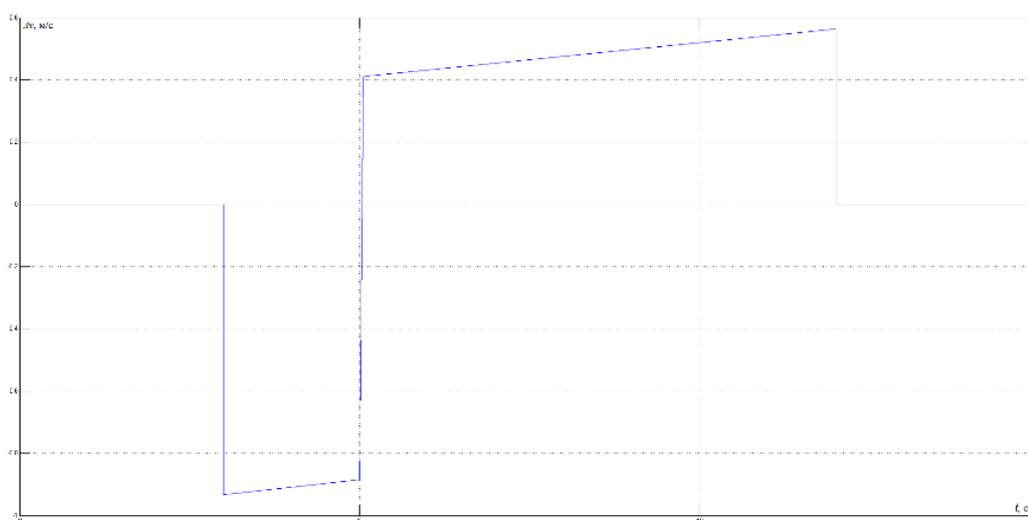


Рисунок 5.– Зависимость рассогласования между окружной скоростью ролика трайб-аппарата и линейной скоростью материала от времени

Также были получены результаты рассогласования скоростей при введении в систему блока, отвечающего за корректировку скорости по результатам оценки натяжения (рисунок 6).

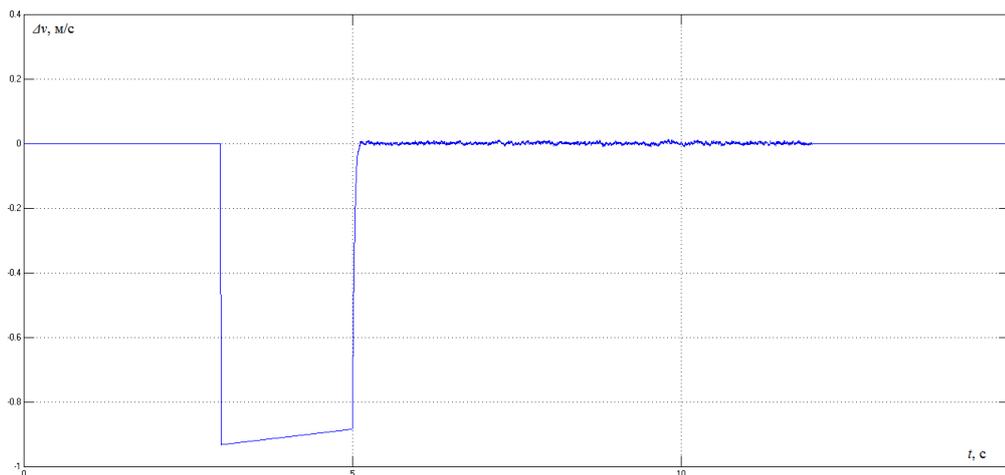


Рисунок 6. – Зависимость рассогласования между окружной скоростью ролика трайб-аппарата и линейной скоростью материала от времени

Видно, что во время транспортировки головной части, рассогласование скоростей увеличивается в положительную сторону. Этот факт вызван постепенным увеличением износа бочки ролика трайб-аппарата, что влечет за собой постепенное снижение окружной скорости ролика. Однако, в режиме сопровождения проката, рассогласование скоростей колеблется около нуля, что вызвано работой алгоритма корректировки задания на скорость по натяжению материала.

### Заключение

Для достижения равенства линейной скорости проката и рабочей поверхности ролика был разработан алгоритм корректировки задания на скорость по натяжению материала. Результаты моделирования показали, что реализация подобного алгоритма не только приведёт к снижению

интенсивности износа бочки ролика, но и уменьшит потребление электроэнергии приводом за счёт существенного уменьшения одной из компонент момента нагрузки, создаваемой силами трения транспортируемого проката.

### Литература

1 Лукьянов С.И., Пишнограев Р.С., Швидченко Н.В. Система управления электроприводом отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета. 2012. №6. С. 95-99

2 Лукьянов С.И., Швидченко Н.В. Снижение износа бочек роликов отводящего рольганга стана горячей прокатки средствами электропривода // Электротехнические системы и комплексы. 2009. №16. С. 174-184

3 Лукьянов С.И., Швидченко Н.В., Пишнограев Р.С., Швидченко Д.В. Снижение интенсивности износа бочек роликов отводящего рольганга средствами электропривода // Механическое оборудование металлургических заводов. 2012. №1. С.73-79

4 Ray A., Arora K.S., Lester S, Shone M. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation. Journal of Materials Processing Technology. 2014. № 214. Pp. 1566–1575.

5 Sanz A. New coatings for continuous casting rolls. Surface and Coatings Technology. 2004. №177–178. Pp. 1-11.

6 Колмыков Д.В., Катенев В.В., Косинов Е.А. О методах упрочняющей обработки стальных изделий // Auditorium. 2016. №4(12). С. 54-56.

7 Емельянов С.Г., Родионов А.А., Осинцев А.Н., Колмыков Д.В. Комбинированный методы упрочняющей обработки стальных изделий //

Известия юго-западного государственного университета. 2012. №2-1 (41). С. 65-71.

8 Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш.учеб. заведений – 2-е изд. // М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.

9 Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. Харьков: Изд-во «Форт», 2009. 272 с.

10 Целиков А.И. Механизмы прокатных станов // М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1946. 272 с.

11 Карандеев Д.Ю., Энгель Е.А. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределённости // «Науковедение». 2015. Том 7. №5. URL: [cyberleninka.ru/article/n/pryamoe-upravlenie-momentom-asinhronnogo-dvigatelya-s-ispolzovaniem-adaptivnogo-neyrokontrollera-v-usloviyah-neopredelennosti/viewer](http://cyberleninka.ru/article/n/pryamoe-upravlenie-momentom-asinhronnogo-dvigatelya-s-ispolzovaniem-adaptivnogo-neyrokontrollera-v-usloviyah-neopredelennosti/viewer)

12 Мощинский, Ю. А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. №4/98. С. 38-42.

13 Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 292 с.

### References

1. Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Shvidchenko N.V. Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta, 2012, №6, p. 95-99.

2. Lukyanov S.I., Shvidchenko N.V. Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy, 2009. №16, pp. 174-184.



3. Lukyanov S.I., Shvidchenko N.V., Pishnograev R.S., Shvidchenko D.V. Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov, 2012. №1, p. 73-79.
  4. Ray A., Arora K.S., Lester S., Shone M. Journal of Materials Processing Technology, 2014, № 214, p. 1566–1575.
  5. Sanz A. Surface and Coatings Technology, 2004, №177–178, p. 1-11.
  6. Kolmykov D.V., Katenev V.V., Kosinov E.A. Auditorium, 2016, №4(12), p. 54-56.
  7. Emel'yanov S.G., Rodionov A.A., Osintsev A.N., Kolmykov D.V. Izvestiya yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2012, №2-1 (41), p. 65-71
  8. Terekhov V.M. Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy [Electric Drive Control Systems: Textbook for Higher Education Institutions]. Moskva: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006, 304 p.
  9. Limonov L.G. Avtomatizirovannyi elektroprivod promyshlennykh mekhanizmov [Automated electric drive of industrial mechanisms]. Khar'kov: Izdvo «Fort», 2009, 272 p.
  10. Tselikov A.I. Mekhanizmy prokatnykh stanov [Rolling mill mechanisms]. Moskva: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1946, 272 p.
  11. Karandeev D.Yu., E`ngel` E.A. «Naukovedenie». 2015. №5. URL:[cyberleninka.ru/article/n/pryamoe-upravlenie-momentom-asinhronnogo-dvigatelya-s-ispolzovaniem-adaptivnogo-neyrokontrollera-v-usloviyah-neopredelennosti/viewer](http://cyberleninka.ru/article/n/pryamoe-upravlenie-momentom-asinhronnogo-dvigatelya-s-ispolzovaniem-adaptivnogo-neyrokontrollera-v-usloviyah-neopredelennosti/viewer)
  12. Moshchinskiy Yu. A., Bepalov V. Ya., Kiryakin A. A. Elektrichestvo. 1998. №4/98. pp. 38-42.
-



13. Terekhin, V.B. Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink (Matlab 7.0.1): uchebnoe posobie [Modeling Electric Drive Systems in Simulink (Matlab 7.0.1): Tutorial]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. p. 292.

**Дата поступления: 21.10.2024**

**Дата публикации: 27.11.2024**