

## Системы управления перемещением раската для обрезки его концов на ножницах после блюминга

V. G. Faynshteyn, V. A. Tsvetnov

Kryvyi Rih metallurgical Institute of the National  
metallurgical Academy of Ukraine, Krivoy Rog,  
Ukraine

### Control system of displacement of the breakdown bar for trimming its ends on bloom shears

**Цель.** Рассматриваются ошибки предлагаемых систем автоматического управления движением раската для обрезки его концов, когда раскат транспортируется одновременно несколькими рольгангами с целью их уменьшения.

**Методика.** Предложено вычислять величину перемещения раската при торможении, для установки в заданное положение конца раската, по усредненному значению углового перемещения валов двигателей рольгангов.

**Результаты.** Приведены результаты исследования электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования координат при перемещении раската двумя рольгангами.

**Научная новизна.** Для уменьшения погрешности вычисления положения раската по угловому перемещению валов электродвигателей предложено ввести усредняющие связи по токам электродвигателей. Приведен алгоритм управления положением раската с коррекцией ошибки по линейному закону.

**Практическая значимость.** Развитие теории и практики расчета систем автоматического регулирования электроприводами, в том числе многодвигательными, позволит повысить точность регулирования. (Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.)

**Ключевые слова:** электропривод, перемещение, раскат, рольганг, регулирование положения, погрешности, усредненное значение.

Задача автоматического управления подачей раската рольгангами на ножницы 1250 т после блюминга давно интересует разработчиков, ее эффективное решение позволит сократить время на эту операцию и уменьшить отходы металла в брак за счет более точной установки длины обрезки. Однако до настоящего времени, как нам известно, в эксплуатации нет эффективно работающей подобной системы. Предлагаемые проекты системы [1] базируются в основном на автоматизации процесса позиционирования раската за счет фотодатчиков, фиксирующих его перемещение, без анализа системы электропривода, его возможностей и ошибок.

Поэтому в предлагаемой работе рассматривается электропривод рольгангов с точки зрения его влияния на решение поставленной задачи по позиционированию раската для обрезки его концов. Интерес представляют ошибки системы при установке раската в заданное положение для обрезки дефектной части, для чего отсчет положения начинается при его торможении [1].

Для стандартной двухконтурной системы подчиненного регулирования скорости ошибки отработки положения вала двигателя (вала роликов), при отсутствии контура регулирования положения и торможении по линейному закону, определяются:

- ошибкой измерения скорости  $\delta\omega$ , примем, что она постоянная на участке торможения  $\delta\omega = 0,02 \omega_{\max}$ ;

- динамической ошибкой  $\delta\varphi$  при отработке заданной диаграммы скорости на участке торможения, если время торможения  $Tz \gg 2a_C T_T$ , то:

$$\delta\varphi_d = \varepsilon_T a_C T_T \cdot (Tz - 2a_C T_T), \quad (1)$$

где  $a_C$  - коэффициент настройки регулятора скорости;  $T_T$  - постоянная контура тока;  $\varepsilon_T$  - угловое замедление вала двигателя;

- ошибкой, связанной с изменением момента нагрузки на валу двигателя  $\delta\varphi_m$ , примем, что значение момента нагрузки может изменяться в пределах  $0,2 M_H$ , тогда:

$$\delta\varphi_m = \frac{0.02M_H a_C T_T}{J_s} \cdot T_z, \quad (2)$$

$J_s$  – суммарный момент инерции системы.

Например, при параметрах роляганга [2]: величина замедления раската – 3 м/с<sup>2</sup>, максимальная скорость – 2,1 м/с, диаметр роликов  $d_r = 0,45$  м, передаточное отношение редуктора  $i_r = 5,6$ ; получаем, что максимальная скорость вращения вала двигателя  $\omega_{\max} = 52,3$  рад/с, допустимое угловое замедление вала двигателя  $\varepsilon_T = 74,7$  рад/с<sup>2</sup>. Приведенный момент инерции  $J_s = 12,9$  кгм<sup>2</sup>, настройка регуляторов  $T_T = 0,015$  с,  $a_C = 2$  [3]. Для данных значений отклонение положения раската от расчетного  $\delta L = \frac{\delta\varphi_d + \delta\varphi_m}{i_r} \cdot \frac{d_r}{2} = 0,136$  м, при расчетном значении пути торможения 0,735 м.

С учетом проскальзывания раската на роляганге ошибка в скорости перемещения раската относительно заданной будет еще выше. Таким образом, для утверждения о возможности компенсации рассмотренных ошибок [1] по дискретно измеренному перемещению раската в отдельных точках торможения необходимо определиться с допустимой дискретностью измерения положения раската, способом измерения скорости и величины перемещения раската. Между измеренным значением скорости перемещения раската по скорости вращения вала электродвигателя и фактической скоростью имеется рассогласование из-за пробуксовок раската. Накопленная ошибка по перемещению раската существенно зависит от дискретности (количества фотореле на пути торможения), и для её компенсации потребуются значительное увеличение замедления по сравнению с расчетным, что приведет к буксованию раската на ролягангах и увеличению ошибки установки раската под ножницами.

Проанализируем вопрос измерения скорости и положения раската при учете следующего обстоятельства – длина раската превышает длину роляганга, поэтому его транспортирование осуществляется двумя, а в некоторые моменты времени и тремя ролягангами. Рассмотрим случай, когда транспортирование осуществляется двумя ролягангами, кинематическая схема имеет вид, показанный на рис. 1.

На рис. 1 (все моменты приведены к валу ролика.):

$M_{sd}$  ( $M_{sc}$ ) – момент, движущий (тормозящий) раскат;

$M_{d1}$  ( $M_{d2}$ ) – момент механической части первого (второго) роляганга (массы раската);

$M_{c1}$  ( $M_{c2}$ ) – момент сопротивления на валу роликов первого (второго) роляганга;

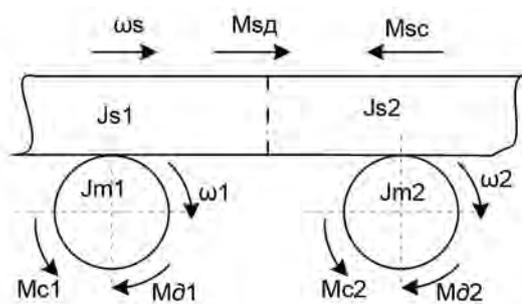


Рис. 1. Кинематическая схема передвижения раската двумя ролягангами

$\omega_s$  – приведенная к валу ролика скорость движения раската;

$\omega_1, \omega_2$  – скорости вращения роликов первого и второго роляганга;

$J_{s1}$  ( $J_{s2}$ ) – приведенный к валу ролика момент инерции части раската, лежащей на первом (втором) роляганге.

Угловые скорости вращения роликов могут отличаться друг от друга, как по причинам, отмеченным выше, так и из-за конструктивных и технологических особенностей ролягангов [2]. Откуда момент, движущий раскат, равен сумме моментов сухого трения покоя роликов первого и второго ролягангов. Момент сухого трения покоя определяется по выражению [2]:

$$M_{st} = Q_s \cdot \mu_{st} \cdot d_r / 2, \quad (3)$$

где  $Q_s$  – часть веса раската, которая опирается на ролики роляганга (предполагается, что вес распределяется равномерно на ролики, находящиеся с ним в контакте);  $\mu_{st}$  – коэффициент трения (0,3 при транспортировании горячего металла и 0,15...0,2 – холодного [2]);

Момент сухого трения скольжения роликов о раскат при разнице скоростей ролика и раската в общем случае можно рассматривать как момент трения между поверхностями и определить по выражению [4]:

$$M_{t\omega} = Q_s \cdot f_t(\Delta\omega) \cdot d_r / 2, \quad (4)$$

где  $f_t(\Delta\omega)$  – коэффициент трения скольжения, зависящий от разности приведенных к валу ролика линейных скоростей слитка и рабочей поверхности ролика.

Коэффициент трения скольжения нелинейно зависит от разницы скоростей [5], но всегда при  $\Delta\omega = 0$  равен нулю. За точку отсчета примем работу роляганга без пробуксовок и, ввиду малости  $\Delta\omega$ , линеаризируем зависимость  $f_t(\Delta\omega)$  вблизи этой точки, т. е.  $f_t(\Delta\omega) \approx f_{t\omega} \cdot \Delta\omega$  и  $M_{t\omega} \approx Q_s \cdot f_{t\omega} \cdot \Delta\omega \cdot d_r / 2$ .

Динамические моменты в механической части:

– динамический момент, приведенный к валу ролика, действующий на часть раската, равный

$Mds = Js \cdot \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – угловое ускорение вала ролика;  $Js = Qs1(2) \cdot d_r^2 / 4g$  – момент инерции части раската, контактирующей с роликами рольганга);  
 – динамический момент масс рольганга и двигателя без раската  $Mdr = Jr \cdot \varepsilon$ , ( $Jr$  – суммарный момент инерции масс рольганга и двигателя без раската, приведенный к валу ролика).

Рассмотрим случай, когда трение скольжения мало и им можно пренебречь, ролики вращаются с постоянной, но различной скоростью, и пусть из-за ошибок системы регулирования  $\omega_1 > \omega_2$  при одинаковом задании скорости. Механическая часть рассчитана таким образом, что выполняется условие:

$$|Mst1(2)| \geq |Js \cdot \varepsilon| \quad (5)$$

Вследствие релейности характеристики момента трения покоя для управления движением раската путем изменения скоростей электродвигателей в системе должны быть автоколебания скоростей и моментов с некоторым периодом  $T_k$ . Поэтому эффективное управление перемещением раската возможно при условии:

$$\Delta\omega_1 \geq \Delta\omega_s \geq \Delta\omega_2, \quad (6)$$

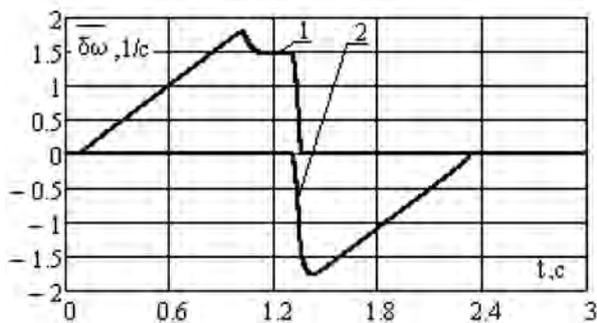
где  $\Delta\omega_1(2)$ ,  $\Delta\omega_s$  – изменение скоростей вращения роликов и раската за период  $T_k$ .

Тогда из условия равенства моментов при движении раската получаем:

$$\overline{Mst1} + \overline{Mst2} = \overline{Mt\omega_1} + \overline{Mt\omega_2} + Js \cdot \bar{\varepsilon}. \quad (7)$$

При разгоне раската  $|\overline{\Delta\omega_1} - \overline{\Delta\omega_s}| \gg |\overline{\Delta\omega_2} - \overline{\Delta\omega_s}|$ , а при торможении  $|\overline{\Delta\omega_1} - \overline{\Delta\omega_s}| \ll \ll |\overline{\Delta\omega_2} - \overline{\Delta\omega_s}|$  (черта над переменной обозначает её среднее значение за период  $T_k$ ).

На рис. 2 приведены осциллограммы, полученные на модели электропривода системы из двух рольгангов, при ошибке датчика скорости первого рольганга –2 %. Система регулирования скорости с последовательной коррекцией, регулятор скорости – пропорциональный, коэффициент настройки регулятора  $a_C = 2$ .



Естественным является стремление разработчиков ввести контур регулирования положения переднего конца раската. Одним из вариантов контура регулирования положения можно считать предложение авторов [1] дискретно измерять положение раската за счет установки датчиков контроля положения раската в  $m$ -х точках пути его торможения, измерять его скорость и корректировать тахограмму движения раската по результатам измерения. Но препятствием для реализации этого предложения являются проблемы, изложенные выше.

Для качественного решения задачи позиционирования необходимо более точное измерение параметров траектории движения раската, с этой целью рассмотрим усредненное движение в системе многодвигательного электропривода [6]. Суммарная ошибка усредненного движения:

$$\overline{\delta y} = \sum_{k=1}^n \frac{\delta y_k}{n}, \quad (8)$$

где  $\delta y_k$  – ошибка  $k$ -го канала привода;  $n$  – число каналов.

Для нашего случая: скорости вращения валов электродвигателей  $\omega_1(2)$ , усредненное значение скорости  $\bar{\omega}$  и линейное перемещение раската  $vr$ , если выполняются условие (5), связаны соотношением:

$$\omega_1 \cdot ir \cdot \bar{d}_r / 2 > vr = \bar{\omega} \cdot ir \cdot \bar{d}_r / 2 > \omega_2 \cdot ir \cdot \bar{d}_r / 2. \quad (9)$$

Таким образом, усредненное движение характеризует перемещение раската с несколько меньшей ошибкой, чем скорости и угловое перемещение вала двигателя одного из рольгангов.

Для уменьшения ошибки вычисления скорости и перемещения раската воспользуемся управлением по методу мнимого статизма [6], для чего задание скорости на входе регулятора скорости каждого электродвигателя постоянно тока сформируем по закону:

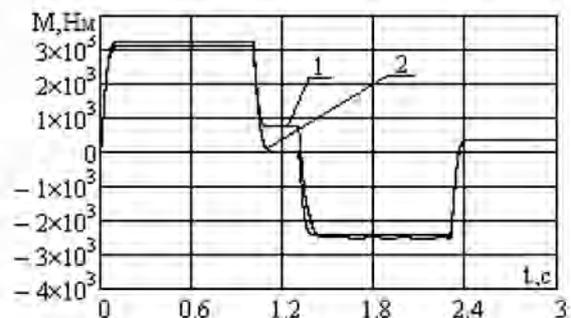


Рис. 2. Результаты моделирования перемещения раската двумя рольгангами:

а) отклонение скоростей: 1 –  $\delta\omega = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_s$ , 2 –  $\delta\omega = \Delta\omega_2 - \Delta\omega_s$ ; б) усредненные значения моментов: 1 – момент на валу двигателя первого рольганга; 2 – момент на валу двигателя второго рольганга

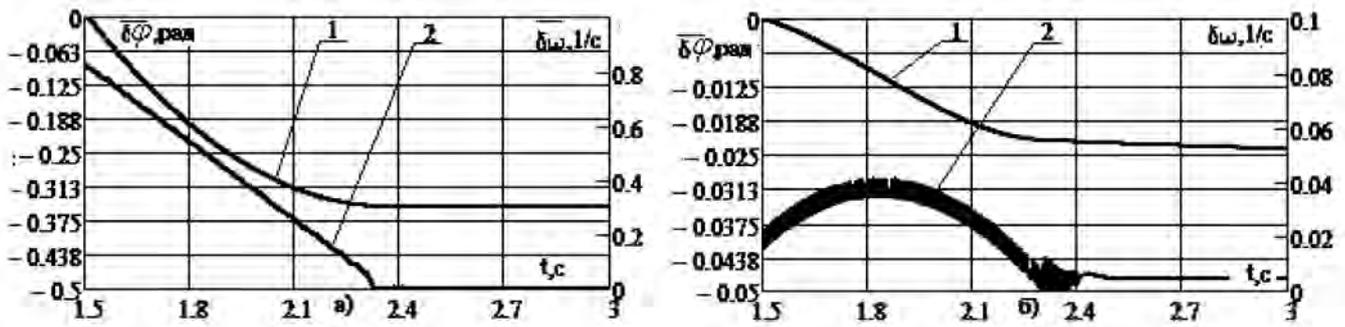


Рис. 3. Отклонение скорости (1- $\overline{\delta\varphi}$ ) и перемещения раската (2- $\overline{\delta\omega}$ ), приведенных к валу двигателя, от усредненных значений:

а) без усредняющих связей по токам двигателей; б) с усредняющими связями

$$\omega_{zk} = \omega_{3И} - K_{mw} \cdot \left( I_k - \frac{1}{n} \sum_{q=1}^m I_q \right) \quad (10)$$

где  $I_k$  – ток якоря электродвигателя  $k$ -го рольганга;  $K_{mw}$  – коэффициент настройки узла усреднения;  $\omega_{zk}$  – задание скорости на входе регулятора скорости  $q$ -го рольганга;  $\omega_{3И}$  – сигнал с выхода общего задатчика скорости;  $m$  – количество рольгангов, одновременно транспортирующих раскат.

Результаты моделирования для приведенных выше параметров системы показаны на рис. 3.

Из рис. 3 можно заметить, что ввод усредняющих связей уменьшает ошибки примерно в 10 раз, и значения ошибки по перемещению находятся на уровне ошибок, полученных при измерении перемещения с помощью фотореле. Следовательно, на базе предлагаемого метода измерения перемещения можно построить регуляторы перемещения, работающие с дискретностью регуляторов цифровой системы управления электропривода, практически как непрерывные регуляторы.

Обычно регулятор положения для устранения накопленных ошибок на этапе разгона электропривода и движения с установившейся скоростью включают во время торможения по сигналу дополнительного дискретного датчика положения, далее процесс торможения разбивают на два участка [7]:

- участок относительно больших отклонений, где регулятор положения работает по параболическому закону или скорость регулируется по заданному закону в функции времени;
- участок дотягивания, где скорость поддерживается малой постоянной или регулятор положения работает по линейному закону.

Дотягивание с постоянной скоростью обычно применяют при отсутствии непрерывного измерения перемещения и наличии быстродействующего механического тормоза, фиксирующего механическую систему в конечном положении.

В нашем случае раскат фиксируется прижимом ножиц, который работает медленно и не предназначен для работы в системе привода.

Дотягивание при работе регулятора по линейному закону иллюстрируется кривыми на рис. 4, где: 1 – расчетная траектория усредненного движения на участке торможения раската  $\overline{\omega} = f(\varphi_T)$ ,  $\varphi_T$  – расчетный путь торможения раската, приведенный к валу двигателя; 2 – то же, но при наличии ошибок измерения скорости и положения; 3 – траектория при дотягивании.

Алгоритм работы системы регулирования следующий:

- в некоторой точке А, которая фиксируется сигналом фотореле по положению переднего конца раската, вычисляется фактическая усредненная скорость вращения валов двигателей рольгангов;
- рассчитывается коэффициент передачи узла формирования траектории для отработки регулятором положения  $k\varphi = \Delta\omega / \Delta\varphi$ ;
- вычисляется задание скорости по закону  $\omega_z = \omega - k\varphi * \Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  – текущее значение расстояния до точки останова раската.

Абсолютное значение приращения величины замедления при корректировке траектории определяется из выражения:

$$\Delta\varepsilon = \delta\omega \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} \quad (11)$$

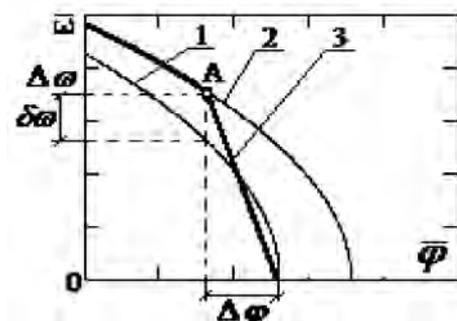


Рис. 4. Дотягивание по траектории  $\omega_z = \omega - k\varphi * \Delta\varphi$

При уменьшении  $\Delta\phi$ , величина  $\frac{d\omega}{d\phi}$  увеличивается, следовательно, для компенсации ошибок будет существенно увеличиваться величина замедления. С другой стороны, при дотягивании скорость изменяется по экспоненциальному закону и соответственно увеличивается время цикла (при заданной погрешности измерителей, дотягивание при постоянной скорости увеличивает цикл больше, чем при линейном законе). Поэтому выбор положения фотореле для включения режима дотягивания должен обеспечивать компромисс между удлинением цикла позиционирования и приращением величины замедления. Эта задача для известных параметров электромеханической системы решается.

В настоящее время освоены лазерные измерители скорости перемещения раската, которые обеспечивают высокую точность измерения скорости перемещения и положения раската (по данным изготовителей погрешность измерения скорости  $<0,05\%$ ). Недостатком таких датчиков является достаточно высокая задержка сигнала ( $t_z \leq 5$  мс), что приведет к увеличению динамических ошибок [8]. Поэтому обратим внимание на возможные проблемы при их применении в данной системе управления положением раската. Применение их в качестве датчика скорости для регулирования скорости электродвигателей рольгангов ограничивается также отсутствием жесткой связи между раскатом и валом роликов рольгангов. Это обстоятельство с большой долей вероятности приведет к потере устойчивости системы, например, скорость раската может поддерживаться постоянной при увеличении скорости роликов одного рольганга и одновременного уменьшения скорости второго рольганга.

Очевидным является уменьшение ошибки позиционирования при использовании лазерного датчика для формирования команды на начало торможения и для расчета тахограммы в режиме дотягивания по линейному закону.

**Выводы**

1. Для эффективного управления процессом обрезки концов раската на ножницах после блюминга при транспортировании раската несколькими рольгангами целесообразно измерять скорость и положение раската на основании усредненных значений скорости вращения и углового перемещения валов электродвигателей, приводящих в движение ролики рольгангов.

2. Уменьшить погрешность вычисления значения скорости и положения раската можно путем ввода усредняющих связей по току нагрузки электродвигателей.

3. Предложенные мероприятия позволяют использовать накопленный опыт реализации позиционных систем управления электропривода.

**Библиографический список / References**

1. Давидченко В. М. Автоматизированная система зачистки переднего и заднего концов раската на 1250-т ножницах блюминга (АСЗКР) / В. М. Давидченко, Ю. Г. Самборский, В. Я. Хижняк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 2. – 123 с.

Davidchenko V. M., Samborskiy Yu. G., Khizhnyak V. Ya. *Avtomatizirovannaya sistema zachistki perednego i zadnego kontsov raskata na 1250-t nozhnitsakh blyuminga (ASZKR)*. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', 2015, no. 2, 123 p.

2. Целиков А. И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3 / А. И. Целиков, П. И. Плухин, В. М. Гребеник [и др.]. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.

Tselikov A. I., Plukhin P. I., Grebenik V. M. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov*. Vol. 3. Mosocw, Metallurgiya, 1988, 680 p.

3. Фишбейн В. Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока / В. Г. Фишбейн. – М.: Энергия, 1972. – 136 с.

Fishbeyn V. G. *Raschet sistem podchinennogo regulirovaniya ventil'nogo elektroprivoda postoyannogo toka*. Mosocw, Energiya, 1972, 136 p.

4. Хильмон В. И. Анализ динамики многодвигательного электропривода рельсового транспорта / В. И. Хильмон, О. Ф. Опейко, Д. С. Однолько // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. Энергетика. – 2015. – № 1. – С. 25–32.

Khil'mon V. I., Opeyko O. F., Odnol'ko D. S. *Analiz dinamiki mnogodvigatel'nogo elektroprivoda rel'sovogo transporta*. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG. Energetika, 2015, no. 1, pp. 25-32.

5. Крагельский И. В. Коэффициенты трения: справ, пособие / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1955. – 188 с.

Kragel'skiy I. V., Vinogradova I. E. *Koeffitsiyenty treniya*. Mosocw, Gos. nauch.-tekhn. izd-vo mashinostroitel'noy literatury, 1955, 188 p.

6. Файнштейн В. Г. Анализ динамических режимов многодвигательного электропривода / В. Г. Файнштейн, В. А. Цветнов, Р. В. Рогальская // *Науковий Вісник Національного гірничого університету*. – Дніпропетровськ, 2010. – № 6. – 100 с.

Faynshteyn V. G., Tsvetnov V. A., Rogal'skaya R. V. *Analiz dinamicheskikh rezhimov mnogodvigatel'nogo*

*elektroprivoda. Naukoviy Visnik Natsional'nogo girnichogo universitetu. Dnipropetrovs'k, 2010, no. 6, 100 p.*

7. Башарин А. В. Управление электроприводами / Л. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovskiy G. G. *Upravleniye elektroprivodami*. Leningrad, Energoizdat, 1982, 392 p.

8. Файнштейн В. Г. Тиристорный электропривод с микропроцессорным управлением / В. Г. Файнштейн, Э. Г. Файнштейн; под ред. О. В. Слежановского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

Faynshteyn V. G., Faynshteyn E. G. *Tiristornyy elektroprivod s mikroprotsessornym upravleniyem*. Mosocw, Energoatomizdat, 1986, 240 p.

**Purpose.** Here are considered the errors of the proposed systems of automatic control of the breakdown bar motion for trimming its ends, when a bar is transported simultaneously by a number of conveyor tables with a view to reducing.

**Methodology.** It is proposed to calculate the amount of movement of roll when braking, to be installed in a

*predetermined position of the end of roll, based on the average angular displacement shaft roller table motors.*

**Findings.** The results of investigations of the direct current electric drive system with a subordinate control of coordinates when moving the breakdown bar of the two conveyors table.

**Originality.** To reduce the computational error it is suggested to introduce averaging connections to the electromotors currents. Reduced algorithm for the displacement control of breakdown bar with the correction of the error according to the linear law

**Practical value.** Development of the theory and practice of automatic control systems of calculation electric drives including multi-drives, will improve the control precision.

**Key words.** Keywords: electric drive, movement, breakdown bar, conveyor table, displacement control, errors, average value.

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. А. Д. Учителем**

**Поступила 23.11.2016**

