

Л. Г. ЧУБРИКОВ, Е. М. МАРЕНИЧ,  
Ю. П. АБДУЛОВ, Д. И. ЗАУГОЛЬНИКОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Жесткость электропривода является одним из важнейших параметров, оптимальным выбором значений которого можно существенно улучшить качество прокатываемой продукции на непрерывных станах [1, 2]. Причем в зависимости от скорости прокатки и сортамента прокатываемых полос оптимальные значения жесткости электропривода будут различными. В связи с этим возникает задача постоянного измерения жесткости электропривода в процессе работы стана. В данной статье рассматриваются основные вопросы такого измерения.

Коэффициент жесткости электродвигателя представляет собой отношение приращения крутящего момента к приращению скорости двигателя

$$B = \frac{\Delta M}{\Delta n} \quad 0)$$

Известны три способа изменения жесткости электродвигателя

- 1) изменением тока возбуждения двигателя,
- 2) изменением сопротивления якорной цепи двигателя,
- 3) изменением напряжения генератора в зависимости от изменения момента на валу двигателя<sup>1</sup>.

Первый способ применяют обычно при скорости вращения двигателя, выше основной. Применение второго способа в мощных электродвигателях неэкономично и сложно. При помощи третьего способа жесткость электродвигателя можно менять в широких пределах путем жесткой отрицательной или положительной обратной связи по току двигателя в регуляторе напряжения генератора. При положительной обратной связи жесткость увеличивается, при отрицательной — уменьшается. Нас в дальнейшем будет

<sup>1</sup> Здесь и дальше рассматривается система управления Г—Д, получившая преимущественное распространение на современных непрерывных станах

интересовать только уменьшение жесткости электродвигателя [1, 2].

На рис. 1 показана электрическая схема изменения жесткости двигателя по третьему способу. Схема позволяет довольно просто, без переналадки существующей схемы управления электродвигателем и в широком диапазоне изменять жесткость путем изменения эталонного (задающего) напряжения  $U_3^1$  регулятора напряжения генератора РНГ в зависимости от изменения тока двигателя.

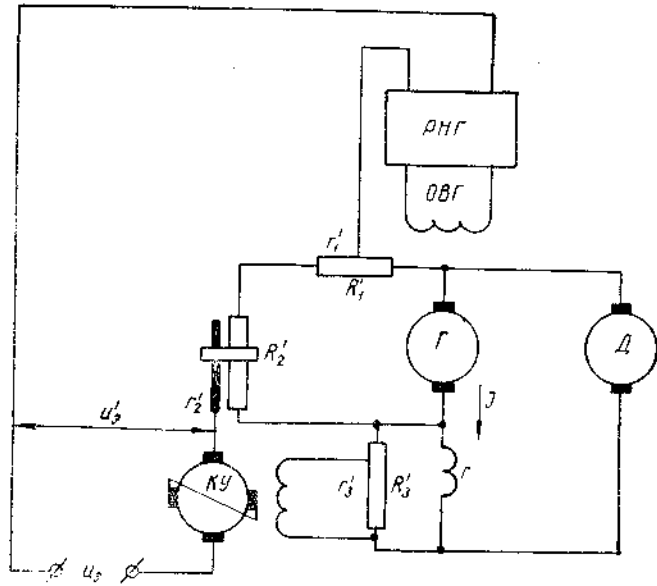


Рис. 1. Изменение жесткости электродвигателя при помощи отрицательной обратной связи по току.

Регулятор напряжения генератора РНГ поддерживает соотношение

$$U_r \approx \frac{u_3'}{\alpha}, \quad (2)$$

где  $U_r$  — напряжение на выходе генератора;  
 $\alpha = \frac{r_1' + r_2'}{R_1' + R_2'} \cdot r_1'$  и  $r_2'$  части сопротивлений  $R_1'$  и  $R_2'$  соответственно.

При жесткой отрицательной обратной связи по току (см. рис. 1)

$$U_3' = U_3 - K_y r \frac{r_3'}{R_3'} I = U_3 - K_y \cdot r \frac{r_3'}{R_3'} \cdot \frac{M}{C_M \Phi}, \quad (3)$$

где  $U_3$  — эталонное (задающее) напряжение при отсутствии обратной связи по току;

$K_y$  — общий коэффициент усиления по напряжению компенсационного усилителя КУ (при необходимости может быть двухкаскадное усиление);

$r$  — сопротивление компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов генератора;

$M$  — момент на валу двигателя;

$C_M$  — конструктивная постоянная двигателя;

$\Phi$  — магнитный поток возбуждения двигателя.

Известно, что момент  $M$  определяется уравнением

$$M = \frac{C_M \Phi}{R_a} U_r - \frac{C_e C_M \Phi^2}{R_a} n, \quad (4)$$

где  $n$  — скорость вращения двигателя;

$C_e$  — конструктивная постоянная двигателя;

$R_a$  — сопротивление якорной цепи двигателя.

Подставив в (4) значение  $U_r$  из (2) и  $U_3'$  из (3), получим

$$M = \frac{C_M \Phi}{R_a} \cdot \frac{U_3}{\alpha} - K_y \frac{r \cdot r_3'}{R_a \cdot R_3'} \cdot \frac{M}{\alpha} - \frac{C_e C_M \Phi^2}{R_a} n,$$

или в приращениях, учитывая, что  $U_3$  не изменяется при прокатке на данной скорости, установленной оператором,

$$\Delta M = \frac{-\frac{C_e C_M \Phi^2}{R_a}}{1 + K_y \frac{r \cdot r_3'}{R_a \cdot R_3' \alpha}} \Delta n. \quad (5)$$

Тогда жесткость электродвигателя, согласно (1), будет<sup>2</sup>

$$B = \frac{C \cdot \Phi^2}{1 + K \frac{r_3'}{\alpha}}, \quad (6)$$

где

$$C = \frac{C_e C_M}{R_a};$$

$$K = \frac{K_y \cdot r}{R_a \cdot R_3'}.$$

Запишем

$$\alpha = \frac{r_1' + r_2'}{R_1' + R_2'} = \frac{r_1'}{R_1' + R_2'} + \frac{r_2'}{R_1' + R_2'} = \alpha_0 + K_1 \cdot r_2'$$

<sup>2</sup> Так как нас интересует значение  $B$  по модулю, то знак минус в (6) мы опускаем.

и подставим в уравнение (6)

$$B = B_0 \frac{\alpha_0 + K_1 r'_2}{\alpha_0 + K_1 r'_2 + K \cdot r'_3}, \quad (7)$$

где  $B_0 = C\Phi^2$  — жесткость электродвигателя при отсутствии отрицательной обратной связи по току ( $K=0$ ).

До сих пор мы рассматривали одноякорные двигатели. Однако на непрерывных станах для уменьшения инерционности часто устанавливают двигатели в двухъякорном исполнении. Нетрудно показать, что в этом случае

$$B_0 = \frac{C_e C_M}{R'_a} \cdot \frac{\Phi_1^2 R_{a2} + \Phi_2^2 R_{a1}}{R_{a1} + R_{a2}}, \quad (8)$$

где  $R_{a1}, R_{a2}$  — сопротивление цепи первого и второго якорей двигателя;

$\Phi_1, \Phi_2$  — магнитные потоки возбуждения первого и второго якорей двигателя;

$R'_a = \frac{R_{a1} \cdot R_{a2}}{R_{a1} + R_{a2}} + R_\Gamma$ ;  $R_\Gamma$  — сопротивление якорной цепи генератора.

С целью упрощения выражение (8) аппроксимируем уравнением

$$B'_0 = C' \cdot \Phi_{cp}^2, \quad (9)$$

где

$$C' = \frac{C_e C_M}{R'_a};$$

$$\Phi_{cp} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2}.$$

При изменении отношений  $\frac{\Phi_1}{\Phi_2}$  и  $\frac{R_{a1}}{R_{a2}}$  в пределах от 0,8 до 1,2 погрешность аппроксимации не превышает  $\pm 2\%$ . Таким образом, уравнение (7) с учетом равенства (9) справедливо и для двухъякорного двигателя.

Для решения уравнения (7) использована простая схема, приведенная на рис. 2. Решение выражения  $B_0 = C\Phi^2$  осуществляет схема диодного функционального преобразователя ДФП (на рис. 2 обведена пунктиром). Схема ДФП моделирует график функциональной зависимости  $\Phi^2 = f(I_{вд})$ , где  $I_{вд}$  — ток возбуждения двигателя. На вход ДФП подают напряжение  $U_{вх} = K_2 \cdot I_{вд}$ , а на выходе получают  $U_1 = K_3 B_0$ . Расчет параметров ДФП производят на основании известной для каждого двигателя графической зависимости  $\Phi^2 = f(I_{вд})$  по методике, изложенной в работе [3].

Вторая часть уравнения (7) решается при помощи специального делителя напряжения на сопротивлениях  $R_4, R_5, R_6$  (см. рис. 2). Действительно, напряжение на выходе такой цепи

$$U_c = U_1 \frac{R_5 + R_6}{R_4 + R_5 + R_6}. \quad (10)$$

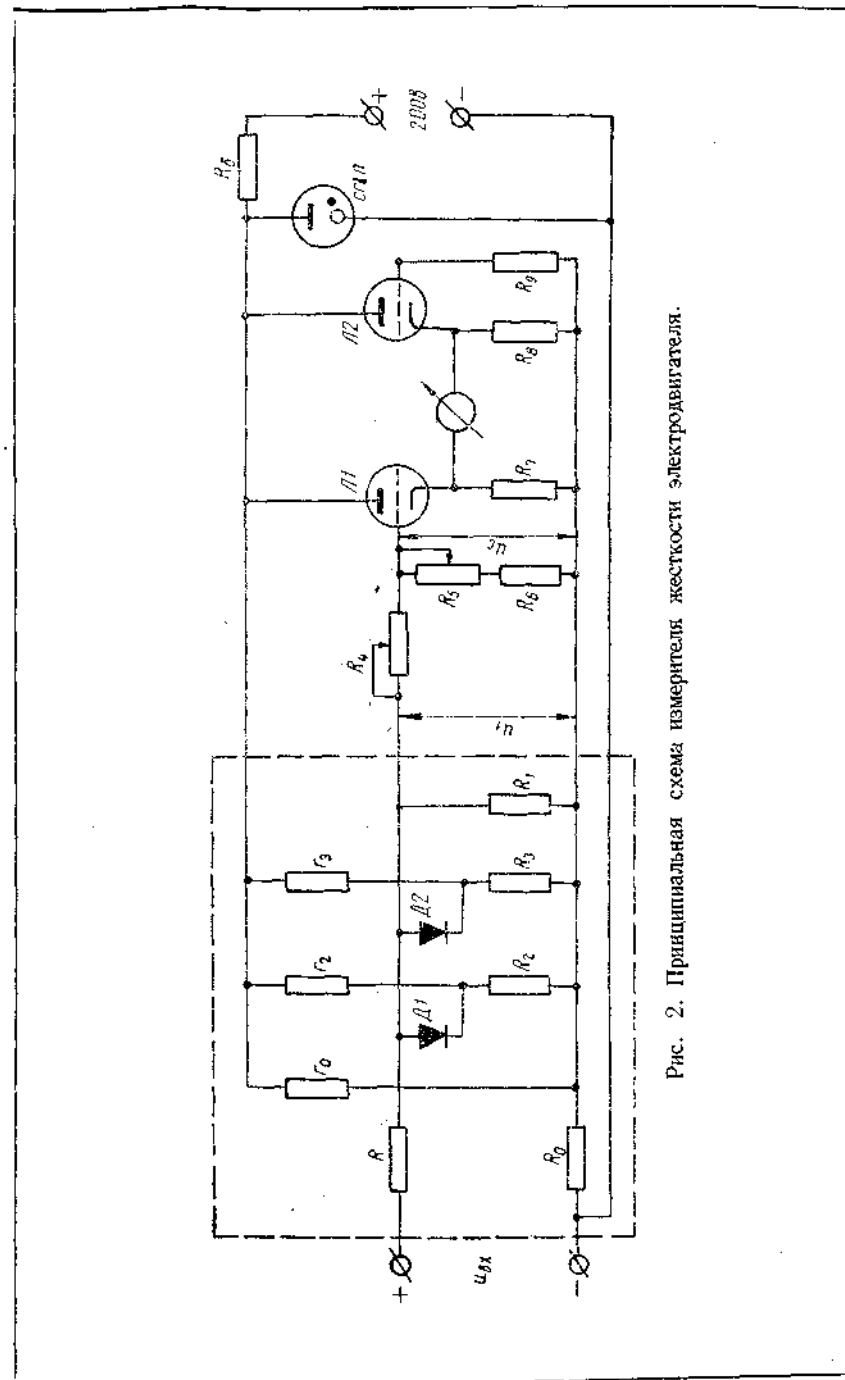


Рис. 2. Принципиальная схема измерителя жесткости электродвигателя.

Если выбрать  $R_4 = K_4 \cdot K \cdot r_3'$ ,  $R_5 = K_4 \cdot K_1 \cdot r_2'$ ,  $R_6 = K_4 \alpha_0$ , то уравнение (10) будет

$$U_c = K_3 b_0 \frac{K_4 \alpha_0 + K_4 \cdot K_1 \cdot r_2'}{K_4 \alpha_0 + K_4 K_1 r_2' + K_4 \cdot K \cdot r_3'} = K_3 B. \quad (11)$$

Равенство (11) справедливо в том случае, если нагрузка делителя напряжения (см. рис. 2) имеет большое входное сопротивление. Поэтому в качестве нагрузки делителя принята схема катодного вольтметра.

Расчет и конструирование делителя напряжения производят из следующих соображений. После настройки всей схемы управления электроприводом сопротивление  $r_1'$  (см. рис. 1) не изменяется. Поэтому сопротивление  $R_6$  (см. рис. 2) выбирают постоянным (несколько десятков *ком*). Сопротивление плоского контроллера  $r_2'$  (см. рис. 1) изменяется в процессе управления станом, а следовательно, должно изменяться и пропорциональное ему сопротивление  $R_5$  (см. рис. 2). Для выполнения этого условия сопротивление  $R_5$  собирают из множества постоянных последовательно соединенных сопротивлений, напаянных на свободную дорожку плоского контроллера  $R_2'$  (см. рис. 1) согласно равенству

$$R_5 = \frac{R_6}{\alpha_0} \cdot K_1 \cdot r_2' = \frac{R_6}{r_1'} \cdot r_2'. \quad (12)$$

При условии линейной характеристики переменных сопротивлений  $R_3$  (см. рис. 1) и  $R_4$  (см. рис. 2) максимальную величину  $R_4$  находят из уравнения

$$R_4 = \frac{R_6}{\alpha_0} \cdot K \cdot R_3' = K_y \frac{r}{R_a} \cdot \frac{R_c}{r_1'} (R_1' + R_2'). \quad (13)$$

Оба переменные сопротивления  $R_3'$  и  $R_4$  устанавливают на одной оси, благодаря чему сопротивление  $R_4$  изменяется пропорционально изменению  $r_3$ .

Градуировку прибора осуществляют следующим образом. При  $R_4 = 0$  на вход схемы (см. рис. 2) подают напряжение  $U_{вх} = K_2 \cdot I_{вп}$  и отмечают показание прибора. Затем по графику  $\Phi^2 = f(I_{вп})$  находят значение  $\Phi^2$ , соответствующее значению  $I_{вп} = \frac{U_{вх}}{K_2}$ , и вычисляют жесткость двигателя по уравнению (6) при  $r_3' = 0$ . Так как шкала прибора равномерная, то достаточно провести градуировку в 3—4 точках шкалы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ю. П. Абдулов Влияние скорости и некоторых параметров непрерывного стана горячей прокатки на точность толщины полосы Автореф. канд. дисс. Свердловск, 1967
- 2 А. С. Федосиенко Исследование динамических процессов в непрерывных станах холодной прокатки Автореф. канд. дисс. Челябинск, 1968
- 3 В. Б. Смолков Диодные функциональные преобразователи Л, «Энергия», 1967