

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО НАГРЕВУ ДИАГРАММ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ ПРИВОДОМ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ

Толочко О. И., Розкаряка П.И.

Донецкий национальный технический университет

The formulas for calculation of reference points of the desirable diagrams of change of acceleration, speed and position are deduced. The diagrams provide a minimum of losses on heating and allow for limitations on speed and acceleration of the drive. The operational effectiveness of these diagrams in drives of pressure screws for economies of the electric power is demonstrated.

С увеличением производительности контроллеров появляется возможность формирования с их помощью управляющих воздействий, обеспечивающих более сложные законы изменения скорости, чем традиционно используемые треугольные или трапецидальные тахограммы, например, параболические тахограммы, обеспечивающие минимум потребления электроэнергии. Задача экономии электроэнергии с помощью оптимальных законов управления рассматривается уже в течение многих лет [1-3]. В работах [1,2] представлены диаграммы, обеспечивающие оптимум по нагреву без учета и с учетом ограничений на скорость и ускорение привода. При этом возможны четыре типа диаграмм: без ограничения, с ограничением скорости, с ограничением ускорения, с ограничением и скорости и ускорения. В данной статье ставится задача вывода формул для расчета характерных точек всех этих диаграмм и разработки методики определения типа диаграммы на основании анализа параметров конкретного перемещения.

Для расчета воспользуемся следующими относительными единицами:

$$i = \frac{I}{I_{кз}} - \text{ток якоря двигателя;}$$

$$\mu = \frac{M_c}{M_{кз}} - \text{статическая составляющая момента или тока якоря;}$$

$$v = \frac{\omega}{\omega_0} - \text{скорость вращения якоря двигателя;}$$

$$\tau = \frac{t}{T_m} - \text{время;}$$

$$\alpha = \int_0^T v d\tau - \text{путь перемещения механизма;}$$

$$Q = \int_0^T i^2 d\tau - \text{количество тепла, выделяемое в якоре;}$$

где $I_{кз}$ - ток короткого замыкания двигателя, А;

M_c - момент статической нагрузки двигателя, Нм;

$M_{кз}$ - момент короткого замыкания двигателя, Нм;

ω_0 - скорость идеального холостого хода двигателя, c^{-1} ;

T_m - электромеханическая постоянная времени привода, с;

Рассмотрим вопрос минимизации потерь, обусловленных динамическим током якоря, при неизменном магнитном потоке. Потери электроэнергии на нагрев якорной цепи двигателя постоянного тока с учетом уравнения движения привода

$$i = v' + \mu \tag{1}$$

определяется выражением

$$Q = \int_0^T (v' + \mu)^2 d\tau = \int_0^T (j + \mu)^2 d\tau, \tag{2}$$

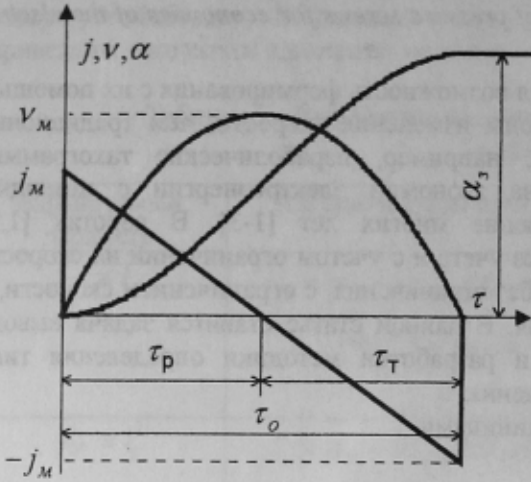
где $v' = \frac{dv}{d\tau} = j$ - относительный динамический ток якоря, равный относительному ускорению.

Тогда потери, обусловленные динамическим током

$$Q = \int_0^{\tau} j^2 d\tau. \quad (3)$$

В [1] доказано, что минимум потерь Q обеспечивается при параболической диаграмме скорости и, соответственно, треугольной диаграмме ускорения (рис. 1). При этом скорость и ток могут оказаться больше своих максимально допустимых значений.

Выведем формулы для расчета оптимальных по минимуму потерь Q диаграмм с учетом ограничений на эти координаты. Минимально возможное время обработки заданного перемещения $\tau_{o\min}$, которое обеспечивается при трапецидальной или треугольной тахограмме (рис. 2), можно определить по формуле:



$$\tau_{o\min} = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_3}{j_0}}, & \alpha_3 \leq \alpha_{zp} \\ 2 \cdot \frac{v_0}{j_0}, & \alpha_3 = \alpha_{zp} \\ \frac{v_0}{j_0} + \frac{\alpha_3}{v_0}, & \alpha_3 > \alpha_{zp} \end{cases} \quad (4)$$

где α_{zp} - максимальное перемещение, которое может быть обработано по треугольной тахограмме при наличии ограничений на скорость и ускорение (назовем его граничным перемещением).

$$\alpha_{zp} = \frac{v_0^2}{j_0}. \quad (5)$$

v_0 - максимально допустимое значения скорости привода.

j_0 - максимально допустимое значение тока (ускорения)

привода.

Если желаемое время обработки заданного перемещения больше минимально возможного времени $\tau_{o\min}$, то возможна работа привода по одной из представленных оптимальных диаграмм: диаграмме без ограничений (рис. 1), диаграмме с ограничением одной координаты (рис. 3, 4) и с ограничением двух координат (рис. 5). Обработка заданного перемещения без ограничения скорости и ускорения реализуема в том случае, если максимальная скорость $|v_m| < v_0$ и максимальное ускорение $|j_m| < j_0$ меньше допустимых значений.

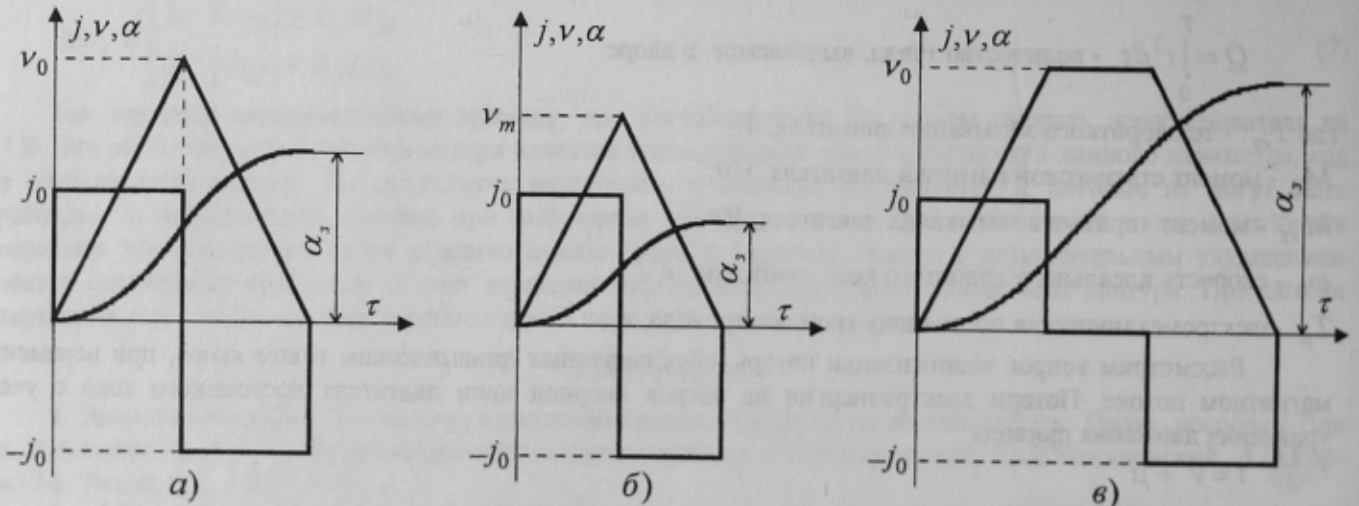


Рис. 2. - Технически оптимальные диаграммы обработки перемещений

а) $\alpha_3 = \alpha_{zp}$, б) $\alpha_3 < \alpha_{zp}$, в) $\alpha_3 > \alpha_{zp}$.

Максимальное значение скорости можно определить из выражения:

$$v_m = \frac{j_m \tau_o}{4} = \frac{3 \alpha_3}{2 \tau_o}; \quad (6)$$

Максимальное значение ускорения:

$$j_m = \frac{6\alpha_s}{\tau_0^2} \quad (7)$$

Тогда время разгона и торможения

$$\tau_p = \tau_T = \frac{\tau_0}{2} \quad (8)$$

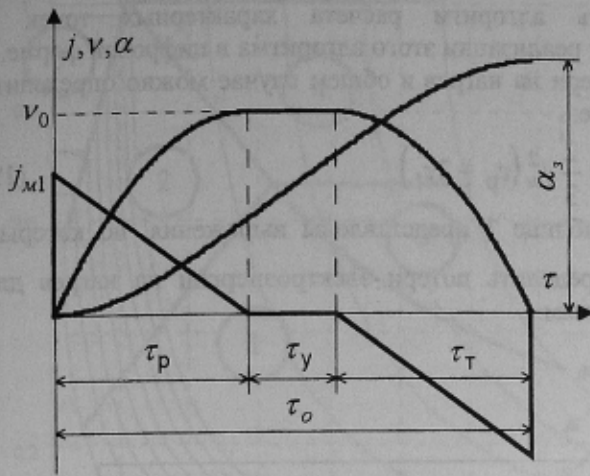


Рис. 3. - Оптимальная по нагреву диаграмма с ограничением скорости

Если $|v_m| > v_0$, а $|j_m| < j_0$, то следует рассматривать вариант с ограничением скорости (рис.3). Время разгона при этом вычисляется как

$$\tau_p = \frac{3}{2} \left(\tau_0 - \frac{\alpha_s}{v_0} \right) \quad (9)$$

При этом максимальное ускорение рассчитывается уже по другой формуле:

$$j_{m1} = \frac{2v_0}{\tau_p} \quad (10)$$

Если $|j_{m1}| < j_0$, то формируется диаграмма с ограничением скорости. Время работы на установившейся скорости τ_y определяется как

$$\tau_y = \tau_0 - 2\tau_p \quad (11)$$

где τ_p определено по формуле (9).

При $|j_m| > j_0$ и $|v_m| < v_0$ необходимо формировать диаграмму с ограничением ускорения (рис.4). В этом случае время движения с постоянным ускорением вычисляется по формуле:

$$\tau_1 = \frac{\tau_0 - \sqrt{3\tau_0^2 - 12\frac{\alpha_s}{j_0}}}{2} \quad (12)$$

а максимальная скорость для этой диаграммы определяется как

$$v_{m1} = \frac{j_0}{4} (\tau_0 + 2\tau_1) \quad (13)$$

При $|v_{m1}| < v_0$ формируется диаграмма с ограничением скорости, иначе – диаграмма с ограничением скорости и ускорения. Заданное перемещение для последней диаграммы определяется как

$$\alpha_s = j_0\tau_1^2 + 2j_0\tau_1(\tau_p - \tau_1) + v_0(\tau_0 - 2\tau_p) + \frac{2}{3}j_0(\tau_p - \tau_1)^2 \quad (14)$$

Время работы с установившимся ускорением

$$\tau_1 = \frac{2v_0}{j_0} - \tau_p \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получаем квадратное уравнение

$$j_0\tau_p^2 - 2v_0\tau_p + 4\frac{v_0^2}{j_0} - 3v_0\tau_0 + 3\alpha_s = 0, \quad (16)$$

откуда находится время разгона

$$\tau_p = \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 - j_0 \left(4\frac{v_0^2}{j_0} - 3v_0\tau_0 + 3\alpha_s \right)}}{j_0} \quad (17)$$

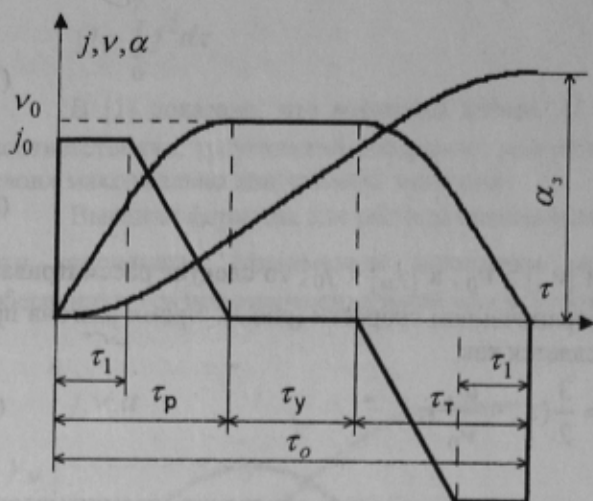


Рис. 5. - Оптимальная по нагреву диаграмма с ограничением скорости и ускорения

Таблица 1. Потери электроэнергии на нагрев

Без ограничения	$12 \frac{\alpha_3}{\tau_0^3}$
С ограничением j	$j_0^2 \tau_0 - j_0^2 \frac{2}{3} \sqrt{3\tau_0 - 12 \frac{\alpha_3}{j_0}}$
С ограничением v	$\frac{16}{9} \frac{v_0^3}{(v_0 \tau_0 - \alpha_3)}$
С ограничением j и v	$2 j_0 v_0 - \frac{2}{3} j_0 \sqrt{v_0^2 - j_0 \left(4 \frac{v_0^2}{j_0} - 3 v_0 \tau_0 + 3 \alpha_3 \right)}$

Для того, чтобы оценить эффективность замены технически оптимальных диаграмм оптимальными по нагреву, рассмотрим электропривод нажимных винтов блюминга 950, состоящий из двух двигателей мощностью по 320 кВт каждый. Привод безредукторный. Шаг винта – 48 мм. Номинальная скорость $\omega=23,6$ рад/с ($v=180$ мм/с). Номинальный ток – $I_n=794$ А. Максимальное ускорение – $\varepsilon=45$ рад/с² ($a=340$ мм/с²). Максимальное перемещение – $s=900$ мм. Граничное перемещение – 95 мм. Характерные для него перемещения при прокатке заготовок находятся в диапазоне 30÷120 мм, а при поступлении каждого нового слитка и кантовках – до 500 мм.

На рисунке 6 представлено семейство зависимостей $\frac{Q}{Q_{\text{то}}} = f(t)$ для различных перемещений с указанием областей работы привода для данного нажимного механизма ($Q_{\text{то}}$ – потери в якоре при обработке заданного перемещения по технически оптимальной диаграмме за минимально возможное время $\tau_{o \text{ min}}$).

А на рисунке 7 – семейство зависимостей $\frac{Q}{Q_{\text{то}}} = f\left(\frac{\tau_o}{\tau_{o \text{ min}}}\right)$ для характерных перемещений. Из рисунков видно, что увеличение времени обработки заданного перемещения в полтора раза относительно минимально возможного времени обработки снижает динамические потери на нагрев в 4,5 раза.

Анализ существующих технологических таблиц прокатки на блюминге 950 показал, что около 20% всех перемещений нажимного устройства происходит во время кантовки слитка. При этом желаемое время обработки перемещения составляет $2 \div 2,5 \tau_{o \text{ min}}$, что позволяет сократить потери электроэнергии, затрачиваемые на эти перемещения, в 10÷20 раз соответственно.

Реальная продолжительность включения при прокатке различных заготовок электродвигателей нажимного устройства составляет 20÷30%, статический ток нагрузки в зависимости от направления

Если время обработки заданного перемещения не лимитируется, то время разгона и торможения определяется как время, обеспечивающее минимум минимум потерь на нагрев:

$$\tau_p = \tau_T = \sqrt{\frac{3\alpha_3}{2\mu}} \quad (18)$$

На основании выведенных формул можно разработать алгоритм расчета характерных точек и программу реализации этого алгоритма в цифровой форме.

Потери на нагрев в общем случае можно определить по формуле:

$$Q = \frac{2}{3} j_m^2 (\tau_p + 2\tau_1) \quad (19)$$

В таблице 1 представлены выражения, по которым можно определить потери электроэнергии на нагрев для всех диаграмм.

перемещения составляет $(0,25 \div 0,6)I_n$. С учетом этих факторов, за счет значительного снижения потерь на нагрев от динамической составляющей тока можно снизить общие энергозатраты на 40-50%, не увеличивая при этом времени отработки перемещений. Более значительного снижения энергозатрат можно достигнуть, увеличивая времена отработки перемещений. Кроме этого, за счет снижения времени работы двигателя с

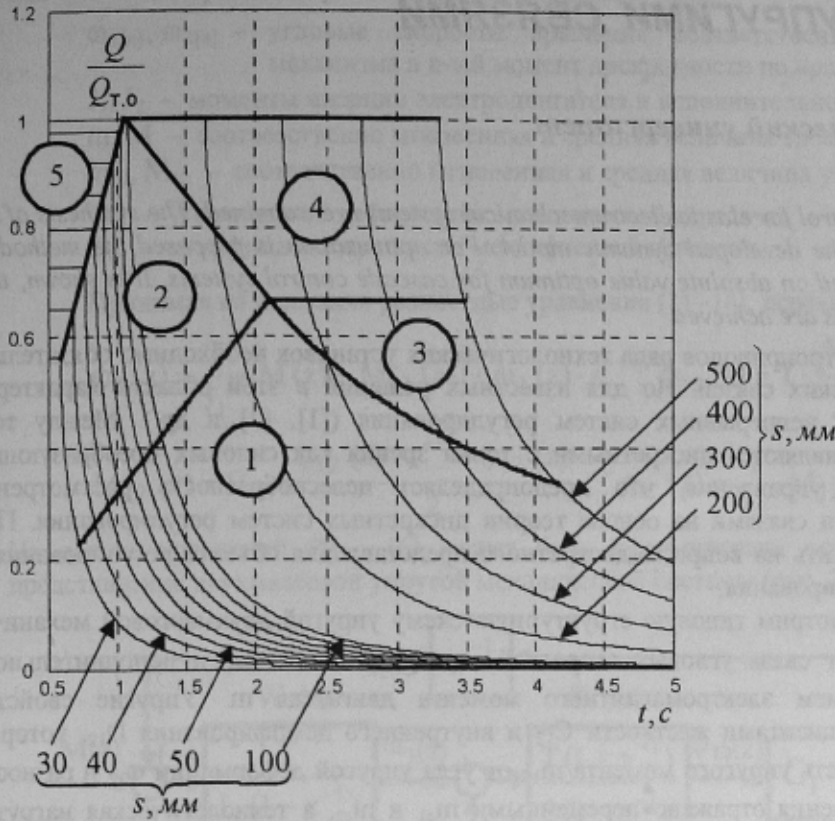


Рис. 6 – Зависимость потерь от времени отработки перемещения

- 1 - область работы без ограничений координат;
- 2 - область работы с ограничением ускорения;
- 3 - область работы с ограничением скорости;
- 4 - область работы с ограничением и скорости и ускорения;
- 5 - область работы по технически оптимальной диаграмме.

током, превышающим номинальный, снижается нагрев двигателя, и, следовательно, увеличивается срок его службы.

Таким образом, цифровая система управления положением, реализующая оптимальные по нагреву законы управления с учетом ограничений на скорость и ускорение, может быть рекомендована для снижения электрических потерь электропривода нажимных винтов прокатного стана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников К. И. Динамика тока двигателей вспомогательных механизмов прокатных станов // Электричество.-1956.- №6.- С. 15-21.
2. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961.- 187с.
3. Кожевников К. И. Экстремальное программное управление механизмом перестановки верхнего вала обжимного стана // Электричество.- 1965.- №6.- С. 32-38.

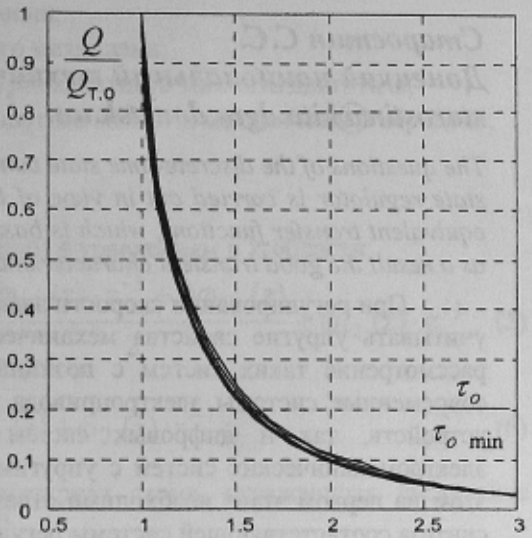


Рис. 7 – Зависимость потерь от времени отработки для характерных перемещений