

УДК 62-83:621.771

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ (ЧАСТЬ 2)

Полилов Е.В., к.т.н., доц., Зеленов А.Б., д.т.н., проф., Яблонь В.П., к.т.н., доц., Морозов Д.И., к.т.н., доц. Донбасский государственный технический университет 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16 E-mail: egor_polilov@mail.ru

У статті дане порівняння діаграм відпрацювання заданого переміщення з погляду втрат енергії: трикутної й трапецеїдальної. Розглянуто 3 варіанти відпрацювання переміщення по трапецеїдальній тахограмі: зі зміною темпу розгону-гальмування, зі зменшенням часу відпрацювання при незмінній максимальній швидкості, зі збільшенням часу відпрацювання. Знайдено співвідношення прискорень, при яких забезпечується максимальне зниження втрат у порівнянні з базовим варіантом.

Ключові слова: прискорення, втрати, час відпрацювання переміщення, трапецеїдальна тахограма.

The paper presents the comparison of the diagrams of execution of given motion from the point of view of energy losses: triangular and trapezoidal. 3 variants of motion execution on trapezoidal tachogram are surveyed: with change of acceleration - deceleration action, with decrease in time of execution at constant maximum speed, with increase in time of execution. The relations of accelerations are given, at which the maximum decrease in losses is provided in comparison with base variant.

Keywords: acceleration, losses, time of motion execution, trapezoidal tachogram.

Введение. Публикацией [1] авторами начат цикл статей, посвященных вопросам энергосбережения в позиционных электроприводах за счет отработки заданных перемещений по определенным «оптимальным» тахограммам движения исполнительного органа.

Анализ предыдущих исследований. В статьях [1-3] рассмотрен способ снижения потерь активной энергии в электроприводе при движении исполнительного органа по треугольным тахограммам за большее, допустимое по технологии, время позиционирования. Однако, вид возможных диаграмм движения довольно широк. На данном этапе авторы ограничились рассмотрением ряда вариантов позиционирования исполнительного органа при постоянных (неизменных во времени) темпах разгона/торможения. В частности, в данной статье авторами рассмотрен процесс позиционирования по трапецеидальным тахограммам движения. Поиск оптимальной (в смысле минимума потерь электроэнергии) трапецеидальной тахограммы - это многовариантная задача, при которой из таких взаимосвязанных показателей как скорость, ускорение, время отработки перемещения и сама величина перемещения достаточно задаваться двумя, и по аналитическим формулам получить конкретные «показатели» оптимизированной диаграммы: время разгона/торможения, время установившегося движения, установившуюся скорость и т.п. Далее из полученных трапецеидальных тахограмм необходимо выбрать одну, при которой потери в электроприводе будут минимальными. В статье рассматриваются три варианта «трансформирования» треугольной та-

хограммы в трапецеидальную и производится анализ снижения потерь энергии в каждом из них:

- при неизменном времени позиционирования с одновременным увеличением темпов разгона/торможения в сравнении с треугольной (базовой) тахограммой;
- при неизменной максимальной скорости и снижении/увеличении времени позиционирования;
- при неизменных темпах разгона/торможения и увеличении времени позиционирования.

Цель работы. Оценка потерь электроэнергии в позиционном электроприводе при различных тахограммах движения исполнительного органа. Вывод аналитических зависимостей и конечных формул расчёта сопутствующих величин, необходимых для формирования оптимальных трапецеидальных тахограмм.

Материал и результаты исследований. Потери энергии, рассеиваемые на активном сопротивлении якорной цепи, на этапе пуска и торможения позиционного электропривода для случая стабилизации динамического момента электропривода при отработке заданного перемещения s_1 по треугольной тахограмме (далее этот факт будет отражён индексом Δ во всех величинах):

$$\Delta A_{п,т} = \left(\frac{J'_\Sigma \pm M_c}{C_{\Phi} I_{дв}} \right)^2 R_{яц} \Delta t_{п,т} \quad (1)$$

Суммарные потери энергии за время $\Delta t_{\Delta} = \Delta t_{\Pi} + \Delta t_{\tau} = 2t_{\Pi, \tau}$ обработки исполнительным органом заданного перемещения s_i составляют:

$$\Delta A_{(\Sigma)\Delta} = \Delta A_{\Pi} + \Delta A_{\tau} = \left[\left(\frac{J_{\Sigma}^2 \omega_{\Delta}^2}{c\Phi_H} \right) + \left(\frac{M_c}{c\Phi_H} \right)^2 \right] R_{яц} \cdot \frac{2\Delta t_{\Delta}}{\Delta t_{\Delta}} \quad (2)$$

Учитывая, что $\Delta t_{\Delta} = \frac{\omega_{\max \Delta}}{\omega_{\Delta}}$, окончательно получим:

$$\Delta A_{(\Sigma)\Delta} = \frac{R_{яц}}{(c\Phi_H)^2} \left[2J_{\Sigma}^2 \omega_{\max \Delta} + M_c^2 \Delta t_{\Delta} \right] \quad (3)$$

Потери энергии, рассеиваемые на активном сопротивлении якорной цепи, на этапе пуска, установившегося движения и торможения позиционного электропривода для случая стабилизации динамического момента электропривода при обработке заданного перемещения s_i по трапецидальной тахограмме (здесь и далее этот факт будет отражён индексом * во всех величинах):

$$\begin{aligned} \Delta A_{(\Sigma)*} &= \Delta A_{\Pi} + \Delta A_{уст} + \Delta A_{\tau} = \\ &= \left[\left(\frac{J_{\Sigma}^2 \omega_{*}^2}{c\Phi_H} \right) + \left(\frac{M_c}{c\Phi_H} \right)^2 \right] R_{яц} \cdot 2\Delta t_{\Pi, \tau} + \\ &+ \left(\frac{M_c}{c\Phi_H} \right)^2 R_{яц} (\Delta t_{*} - 2\Delta t_{\Pi, \tau}) = \\ &= \frac{R_{яц}}{(c\Phi_H)^2} \left[2J_{\Sigma}^2 \omega_{уст*} + M_c^2 \Delta t_{*} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

Определим площади треугольника и трапеции (это, по сути, и есть перемещение исполнительного органа s_i):

$$\begin{aligned} s_{\Delta} &= \omega_{\Delta} k_s \Delta t_{\Delta}^2 / 4 = \omega_{\max \Delta}^2 k_s / \omega_{\Delta}; \\ s_{*} &= \Delta t_{*} \omega_{уст*} k_s - \omega_{уст*}^2 k_s / \omega_{*}, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_s - коэффициент пересчёта, устанавливающий связь между скоростью электродвигателя и линейной скоростью рабочего механизма. Для нажимного устройства с шагом винта h и передаточным числом редуктора i_p коэффициент пересчёта $k_s = h / (2\pi i_p)$.

Величины s_{Δ} и s_{*} равны по определению независимо от характера изменения скорости, тогда, учитывая соотношения (5), ускорение при движении по треугольной и трапецидальной тахограмме:

$$\omega_{\Delta} = \frac{\omega_{\max \Delta}^2}{s_{\Delta}} k_s; \quad \omega_{*} = \frac{\omega_{уст*}^2 k_s}{\Delta t_{*} \omega_{уст*} k_s - s_i} \quad (6)$$

Задача 1. Определим, на сколько изменяются потери электроэнергии при изменении тахограммы движения исполнительного органа позиционного

электропривода с треугольной на трапецидальную с меньшей скоростью $\omega_{уст*} < \omega_{\max \Delta}$, при условии, что $\Delta t_{*} = \Delta t_{\Delta} = \Delta t_i$ (согласно рис. 1):

$$\begin{aligned} \Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta} &= \frac{R_{яц}}{(c\Phi_H)^2} \times \\ &\times \left[2J_{\Sigma}^2 (\omega_{уст*} - \omega_{\max \Delta}) + M_c^2 (\Delta t_{*} - \Delta t_{\Delta}) \right] = \\ &= \frac{2J_{\Sigma}^2 R_{яц}}{(c\Phi_H)^2} (\omega_{уст*} - \omega_{\max \Delta}) \delta \quad (7) \end{aligned}$$

Далее исследуем величину δ . Учитывая соотношения (6), получим:

$$\begin{aligned} \delta &= \omega_{уст*} - \omega_{\max \Delta} = \\ &= \frac{\omega_{уст*}^3 k_s}{(\Delta t_i \omega_{уст*} k_s - s_i) s_{кр*}} - \frac{\omega_{\max \Delta}^3 k_s}{s_i} = \\ &= \frac{\omega_{\max \Delta}^3 k_s}{s_i} \left(\frac{s_i \alpha^3}{s_{кр*}} - 1 \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\alpha = \omega_{уст*} / \omega_{\max \Delta}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз изменяется установившаяся окружная скорость исполнительного органа.

Определим величину «критического» перемещения для трапецидальной тахограммы движения:

$$\begin{aligned} s_{кр*} &= \Delta t_i \omega_{уст*} k_s - s_i = \\ &= \Delta t_i \omega_{уст*} k_s - \frac{1}{2} \Delta t_i \omega_{\max \Delta} k_s = \\ &= \Delta t_i k_s (\omega_{уст*} - 0,5 \omega_{\max \Delta}) = 2s_i (\alpha - 0,5). \end{aligned} \quad (9)$$

Окончательно:

$$\delta = \frac{\omega_{\max \Delta}^3 k_s}{s_i} \left(\frac{\alpha^3}{2\alpha - 1} - 1 \right) \quad (10)$$

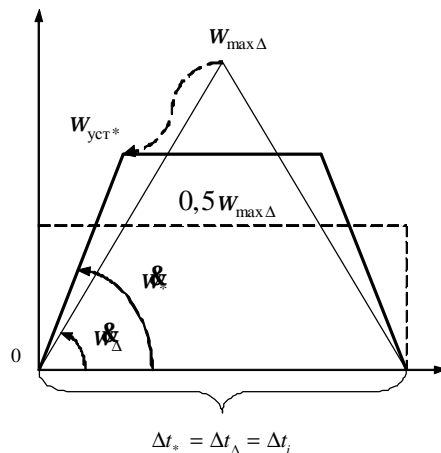


Рисунок 1 - Треугольная и трапецидальная тахограммы движения исполнительного органа

Построим функциональную зависимость $f(\alpha) = \frac{\alpha^3}{2\alpha - 1} - 1$. На рис. 2 представлены результа-

ты построений. Из диаграммы следует, что независимо от параметров механизма в диапазоне $0,62 < \alpha < 1,0$ возможно снижение потерь электроэнергии по отношению к исходной треугольной тахограмме движения.

Абсолютный минимум величины $\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta}$ возможен, когда $\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} = 0$, т.е. при $\alpha = 0,75$. В этой точке потери снижаются на 15,6%. При $\alpha = 0,62$, т.е. в точке, где $f(\alpha) = 0$, потери равны $\Delta A_{(\Sigma)*} = \Delta A_{(\Sigma)\Delta}$ и дальнейшее снижение установившейся скорости $\omega_{уст*}$ приводит к росту потерь. Снижение линейной (окружной) скорости рабочего органа возможно не более чем в 2 раза ($a > 0,5$), что очевидно, поскольку при $\alpha = 0,5$ трапецидальная тахограмма вырождается в прямоугольную. При $\alpha \rightarrow 0,5$, т.е. когда $\omega_{уст*} = 0,5 \omega_{уст\Delta}$ потери электроэнергии стремятся к бесконечности, поскольку необходимо реализовать бесконечное ускорение $\& \rightarrow \infty$.

Отношение кратностей динамического тока/момента (а по сути - отношение угловых ускорений) для рассматриваемого случая изменения тахограммы движения (согласно рис. 1):

$$\frac{\lambda_{п.т*}}{\lambda_{п.т\Delta}} \equiv \frac{\&_*}{\&_{\Delta}} = \frac{\omega_{уст*}^2 k_s}{\Delta t_i \omega_{уст*} k_s - s_i} \times \frac{s_i}{\omega_{макс\Delta}^2 k_s} = \frac{\omega_{уст*}^2}{\omega_{макс\Delta}^2} \frac{s_i}{s_{кр*}} = \frac{\alpha^2}{2\alpha - 1} \quad (11)$$

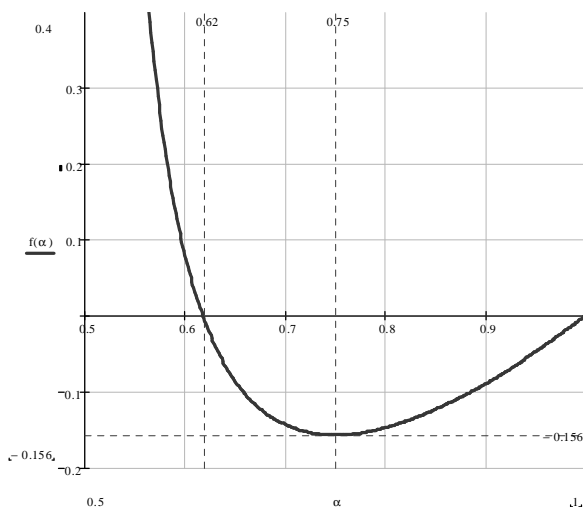


Рисунок 2 - Отношение потерь при трапецидальной и треугольной тахограммах движения исполнительного органа (согласно рис. 1)

В точке минимума потерь энергии, т.е. при $\alpha = 0,75$, искомая величина $\frac{\lambda_{п.т*}}{\lambda_{п.т\Delta}} \equiv \frac{\&_*}{\&_{\Delta}} = 1,125$.

Иными словами, в позиционном электроприводе любое программное перемещение исполнительного органа, независимо от кинематики механизма, выгоднее обрабатывать по трапецидальной тахограмме движения с пониженной на 25% скоростью в отношении к максимальной для треугольной тахограммы. Т.е., если при обработке любого перемещения по «треугольнику» принудительно средствами САР «подсаживать» скорость (одновременно необходимо увеличивать угловое ускорение $\&$, а по сути, кратность пуско-тормозных токов электродвигателя на 12,5 % для реализации той же величины технологического времени обработки перемещения), то потери электроэнергии уменьшаются на 15,6%!

Отношение времён пуска/торможения до максимальной скорости для рассматриваемых диаграмм:

$$\frac{\Delta t_{п.т*}}{\Delta t_{п.т\Delta}} = \frac{\omega_{уст*}}{\&_*} \times \frac{\&_{\Delta}}{\omega_{макс\Delta}} = \frac{\alpha \omega_{макс\Delta}}{\alpha^2 \&_{\Delta}} \times \frac{\&_{\Delta}}{\omega_{макс\Delta}} = \frac{2\alpha - 1}{\alpha} = 2 - \frac{1}{\alpha} \quad (12)$$

При $\alpha = 0,75$ отношение $\frac{\Delta t_{п.т*}}{\Delta t_{п.т\Delta}} = 0,667$.

Время движения исполнительного органа на установившейся скорости трапецидальной тахограммы движения:

$$\Delta t_{уст*} = \Delta t_i - 2\Delta t_{п.т*} = \Delta t_i - 2(2 - 1/\alpha)\Delta t_{п.т\Delta} = \Delta t_i (1/\alpha - 1) \quad (13)$$

При $\alpha = 0,75$ искомая величина $\Delta t_{уст*} = 0,333 \Delta t_i = 0,667 \Delta t_{п.т\Delta}$.

Таким образом, при движении по трапецидальной тахограмме в точке минимума потерь электроэнергии - времена пуска, установившегося движения и торможения равны $\Delta t_{п*} = \Delta t_{уст*} = \Delta t_{т*}$.

Задача 2. Определим, на сколько изменяются потери электроэнергии при изменении тахограммы движения исполнительного органа позиционного электропривода с треугольной на трапецидальную с меньшим временем позиционирования $\Delta t_* < \Delta t_{\Delta}$, при условии равенства максимальных скоростей $\omega_{уст*} = \omega_{макс\Delta} = \omega_{уст i}$ (согласно рис. 3):

$$\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta} = \frac{R_{яц}}{(c\Phi_n)^2} \left[\frac{2J_{\Sigma}^2 (\&_* \omega_{уст*} - \&_{\Delta} \omega_{макс\Delta})}{\delta} + M_c^2 \left(\frac{\Delta t_* - \Delta t_{\Delta}}{\tau \neq 0} \right) \right] \quad (14)$$

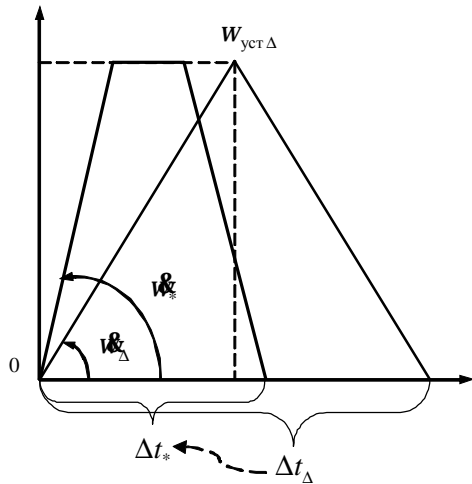


Рисунок 3 - Треугольная и трапецидальная тахограммы движения исполнительного органа

Далее исследуем величину δ . Учитывая соотношения (6), получим:

$$\begin{aligned} \delta &= \omega_{уст*} - \omega_{\max \Delta} = \\ &= \frac{\omega_{устi}^3 k_s}{\left(\frac{\Delta t_* \omega_{устi} k_s - s_i}{s_{кр*}} \right)} - \frac{\omega_{устi}^3 k_s}{s_i} = \\ &= \frac{\omega_{устi}^3 k_s}{s_i} \left(\frac{s_i}{s_{кр*}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Величина «критического» перемещения для трапецидальной тахограммы движения:

$$\begin{aligned} s_{кр*} &= \Delta t_* \omega_{уст*} k_s - s_i = \\ &= \Delta t_* \omega_{устi} k_s - \frac{1}{2} \Delta t_{\Delta} \omega_{устi} k_s = \\ &= \omega_{устi} k_s (\Delta t_* - 0,5 \Delta t_{\Delta}) = 2s_i (\gamma - 0,5), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\gamma = \Delta t_* / \Delta t_{\Delta}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз изменяется время отработки заданного перемещения s_i при переходе на трапецидальную тахограмму движения. Снижение времени отработки заданного перемещения возможно не более чем в 2 раза, т.е. $0,5 < \gamma < 1,0$, что очевидно, поскольку при $\gamma = 0,5$ трапецидальная тахограмма вырождается в прямоугольную.

Окончательно:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\omega_{устi}^3 k_s}{s_i} \left(\frac{s_i}{2s_i (\gamma - 0,5)} - 1 \right) = \\ &= \frac{\omega_{устi}^3 k_s}{s_i} \left(\frac{1}{2\gamma - 1} - 1 \right); \end{aligned} \quad (17)$$

кроме того, величина τ в (14) равна

$$\tau = \Delta t_* - \Delta t_{\Delta} = \Delta t_{\Delta} (\gamma - 1). \quad (18)$$

Функция $f(\gamma) = \frac{1}{2\gamma - 1} - 1$, входящая в (17), построена на рис. 4. Из диаграммы видно, что в диапа-

зоне изменения $0,5 < \gamma < 1,0$ - $f(\gamma)$ всегда положительна, а это означает, что потери энергии в пускотормозных режимах $\Delta A_{п} + \Delta A_{т}$, определяемых величиной δ , при трапецидальной тахограмме движения ($\omega_{уст*} = \omega_{\max \Delta} = \omega_{устi}$) всегда больше, что очевидно, поскольку ускорение $\omega_* > \omega_{\Delta}$. Однако величина $\tau = \Delta t_{\Delta} (\gamma - 1)$ в выбранном диапазоне изменения γ всегда отрицательна, т.е. чем меньше время отработки трапецидального перемещения Δt_* , тем меньше величина потерь электроэнергии, рассеиваемой на активном сопротивлении якорной цепи электропривода, вызванных статической нагрузкой M_c .

Таким образом, можно ожидать некоторую точку оптимума, в которой суммарные потери электроэнергии $\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta}$ минимальны, и не исключено, что будут положительны. Точку оптимума

определим из условия $\frac{\partial (\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta})}{\partial \gamma} \equiv 0$:

$$-\frac{2J_{\Sigma}^2 R_{яц} \omega_{устi}^3 k_s \cdot 2}{(c\Phi_H)^2 s_i (2\gamma - 1)^2} + \frac{M_c^2 R_{яц} \Delta t_{\Delta}}{(c\Phi_H)^2} \equiv 0, \quad (19)$$

отсюда:

$$\begin{aligned} 2\gamma - 1 &= \sqrt{\frac{4J_{\Sigma}^2 R_{яц} \omega_{устi}^3 k_s}{(c\Phi_H)^2 s_i \frac{M_c^2 R_{яц} \Delta t_{\Delta}}{(c\Phi_H)^2}}} = \\ &= \frac{2J_{\Sigma}' \omega_{устi}}{M_c} \sqrt{\frac{\omega_{устi} k_s}{s_i \Delta t_{\Delta}}} = \frac{\sqrt{2}}{M_c} \left(\frac{J_{\Sigma}' \omega_{устi}}{\Delta t_{\Delta} / 2} \right) = \\ &= \frac{\sqrt{2} \lambda_{п.т\Delta} M_{ном}}{M_c} = \sqrt{2} \frac{\lambda_{п.т\Delta}}{\mu_c}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\mu_c = M_c / M_{ном}$ - относительная величина момента статических сопротивлений.

Окончательно:

$$\gamma_{опт} = \frac{\sqrt{2} J_{\Sigma}' \omega_{устi}}{M_c \Delta t_{\Delta}} + 0,5 = \frac{\lambda_{п.т\Delta}}{\mu_c \sqrt{2}} + 0,5; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{* опт} &= \frac{\sqrt{2} J_{\Sigma}' \omega_{устi}}{M_c} + \left(\frac{s_i}{\frac{\omega_{устi} k_s}{\Delta t_{\Delta} / 2}} \right) = \\ &= \frac{\sqrt{2} J_{\Sigma}' \omega_{устi}}{M_c} + 0,5 \Delta t_{\Delta} = \\ &= \frac{\lambda_{п.т\Delta} M_H}{M_c \sqrt{2}} \Delta t_{\Delta} + 0,5 \Delta t_{\Delta} = \\ &= \left(\frac{\lambda_{п.т\Delta}}{\mu_c \sqrt{2}} + 0,5 \right) \Delta t_{\Delta}. \end{aligned} \quad (22)$$

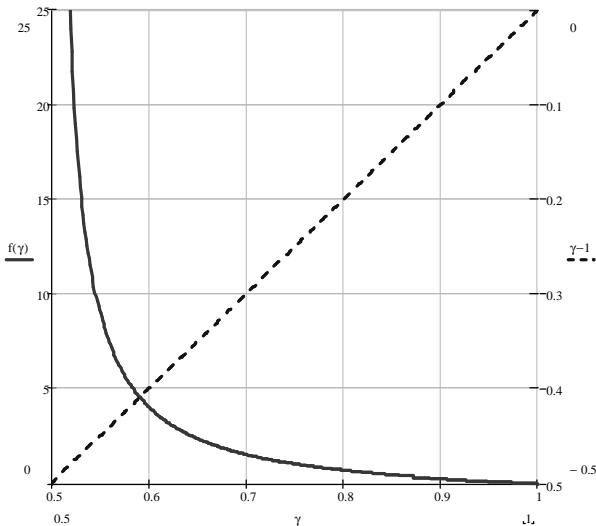


Рисунок 4 - Отношение потерь при трапецидальной и треугольной тахограммах движения исполнительного органа (согласно рис. 3)

Угловое ускорение в точке оптимума составляет

$$\omega_{\text{уст}^*} = \frac{\omega_{\text{уст}^*}^2 k_s}{\Delta t_{\text{опт}} \omega_{\text{уст}^*} k_s - s_i} = \frac{M_c}{\sqrt{2} J_{\Sigma}'} \quad (22)$$

движения электропривода для случая стабилизации динамического момента электропривода определим кратность динамического тока (момента) при отработке заданного перемещения s_i :

$$\lambda_{\text{п.т.}}^{\text{опт}} = \frac{J_{\Sigma}' \omega_{\text{уст}^*}}{M_{\text{ном}}} = \frac{J_{\Sigma}' M_c}{M_{\text{ном}} \sqrt{2} J_{\Sigma}'} = \frac{\mu_c}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

Таким образом, при отработке любого программно перемещения s_i исполнительного органа по «трапеции» в точке минимума потерь электроэнергии кратность пуско-тормозных токов (моментов) постоянна и зависит только от статической нагрузки M_c .

Задача 3. Определим, на сколько изменяются потери электроэнергии при изменении тахограммы движения исполнительного органа позиционного электропривода с треугольной на трапецидальную с большим временем позиционирования $\Delta t_* > \Delta t_{\Delta}$, при условии, равенства угловых ускорений $\omega_{\text{уст}^*} = \omega_{\Delta} = \omega$ (согласно рис. 5):

$$\Delta A_{(\Sigma)^*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta} = \frac{R_{\text{яц}}}{(c\Phi_n)^2} \left[\frac{2J_{\Sigma}'^2 \omega (\omega_{\text{уст}^*} - \omega_{\text{max}\Delta})}{\delta} + M_c^2 (\Delta t_* - \Delta t_{\Delta}) \right] \quad (24)$$

Из рис. 5 следует, что площадь «малого» треугольника, отсекаемая верхним основанием трапеции от треугольника скорости, и площадь параллелограмма, отсекаемая правой стороной треугольника скорости от трапеции, равны по сути, т.е. $s_{\Delta 1} = s_*$:

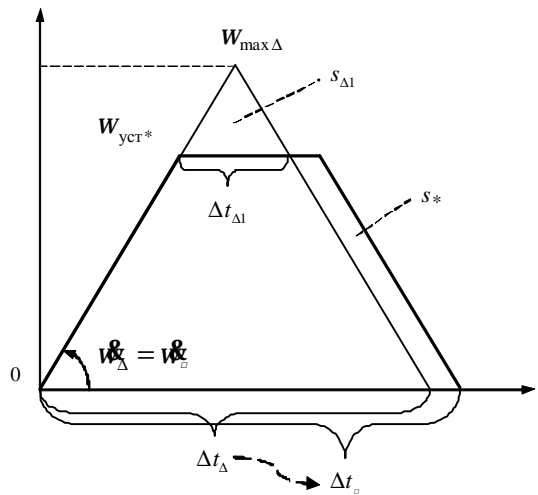


Рисунок 5 - Треугольная и трапецидальная тахограммы движения исполнительного органа

$$s_{\Delta 1} = \frac{1}{2} \Delta t_{\Delta 1} k_s (\omega_{\text{уст}^*} - \omega_{\text{max}\Delta}) \equiv \quad (25)$$

$$\equiv s_* = \omega_{\text{уст}^*} k_s (\Delta t_* - \Delta t_{\Delta}),$$

откуда величина основания «малого» треугольника:

$$\Delta t_{\Delta 1} = \frac{2\omega_{\text{уст}^*} (\Delta t_* - \Delta t_{\Delta})}{\omega_{\text{уст}^*} - \omega_{\text{max}\Delta}} \quad (26)$$

Используя теорему подобия в «малом» и «большом» треугольниках скорости, легко видеть, что

$$\frac{\omega_{\text{уст}^*} - \omega_{\text{max}\Delta}}{\omega_{\text{max}\Delta}} = \frac{\Delta t_{\Delta 1}}{\Delta t_{\Delta}} \quad (27)$$

После несложных преобразований из (26) и (27) может быть найдено соотношение:

$$\frac{\Delta t_*}{\Delta t_{\Delta}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_{\text{max}\Delta}}{\omega_{\text{уст}^*}} + \frac{\omega_{\text{уст}^*}}{\omega_{\text{max}\Delta}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma} + \gamma \right), \quad (28)$$

где $\gamma = \omega_{\text{уст}^*} / \omega_{\text{max}\Delta}$.

С учётом полученного соотношения величина изменения потерь $\Delta A_{(\Sigma)^*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta}$ равна:

$$\Delta A_{(\Sigma)^*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta} = \frac{R_{\text{яц}}}{(c\Phi_n)^2} \left[\frac{2J_{\Sigma}'^2 \omega_{\text{max}\Delta} (\gamma - 1)}{f_1(\gamma)} + M_c^2 \frac{\Delta t_{\Delta}}{2} \left(\frac{1}{\gamma} + \gamma - 2 \right) \right] \quad (29)$$

Функция $f_1(\gamma) = \gamma - 1$, входящая в (29), построена на рис. 6. Из диаграммы видно, что во всём диапазоне изменения $0 < \gamma < 1,0$ - $f(\gamma)$ всегда отрицательна, а это означает, что потери энергии в пуско-тормозных режимах $\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}}$, определяемых величиной, расходуемых исключительно на «динамику» при изменении тахограммы движения исполнительного органа позиционного электропривода с треугольной на трапецидальную с большим време-

нем позиционирования $\Delta t_* > \Delta t_\Delta$, при условии, равенства угловых ускорений $\omega_* = \omega_\Delta = \omega$, всегда меньше, что очевидно, поскольку конечная скорость $\omega_{уст*} < \omega_{\max \Delta}$. Однако функция $f_2(\gamma) = \frac{1}{\gamma} + \gamma - 2$ в выбранном диапазоне изменения γ всегда положительна, т.е. чем меньше время отработки трапецидального перемещения Δt_* , тем меньше величина потерь электроэнергии, рассеиваемой на активном сопротивлении якорной цепи электропривода, вызванных статической нагрузкой M_c .

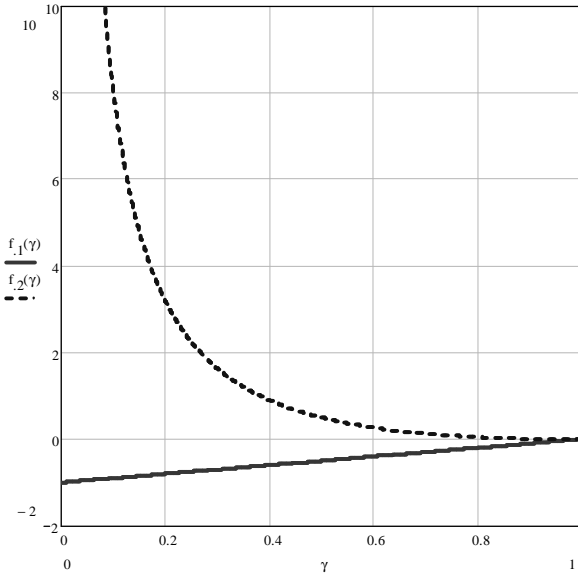


Рисунок 6 - Отношение потерь при трапецидальной и треугольной тахограммах движения исполнительного органа (согласно рис. 5)

Точку оптимума, в которой исследуемая величина $\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta}$ минимальна, определим из условия:

$$\frac{\partial (\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta})}{\partial \Delta t_*} \equiv 0:$$

$$\frac{\partial (\Delta A_{(\Sigma)*} - \Delta A_{(\Sigma)\Delta})}{\partial \Delta t_*} =$$

$$-\frac{2J_{\Sigma}^2 R_{яц} \omega_{\max \Delta}}{(c\Phi_H)^2} + \frac{M_c^2 R_{яц}}{(c\Phi_H)^2} \frac{\Delta t_\Delta}{2} \left(\frac{-1}{\gamma^2} + 1 \right) \equiv 0,$$

отсюда:

$$\gamma_{\text{опт}} = 1 / \sqrt{\frac{2J_{\Sigma}^2 R_{яц} \omega_{\max \Delta}}{(c\Phi_H)^2} \frac{\Delta t_\Delta}{2} + 1} =$$

$$= 1 / \sqrt{\frac{2J_{\Sigma}^2 \omega^2}{M_c^2} + 1} = \frac{\mu_c}{\sqrt{2\lambda_{п.т.\Delta}^2 + \mu_c^2}}.$$

Таким образом, для рассматриваемой задачи в точке минимума потерь электроэнергии с учётом выражений (28) и (31) время отработки заданного перемещения составляет:

$$\Delta t_{* \text{ опт}} = \frac{\lambda_{п.т.\Delta}^2 + \mu_c^2}{\mu_c \sqrt{2\lambda_{п.т.\Delta}^2 + \mu_c^2}} \Delta t_\Delta. \quad (32)$$

Выводы. Для позиционного электропривода энергетически более выгодным (с позиции минимума потерь активной энергии) является движение исполнительного органа по трапецидальным тахограммам движения. Для трёх возможных случаев «трансформирования» базовых диаграмм скорости в трапецидальные получены аналитические зависимости, позволяющие по известным техническим и технологическим данным механизма рассчитать и программно сформировать оптимальные траектории движения исполнительного органа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Полилов Е.В., Зеленов А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах // Электромашинобудовання та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – К.: Техніка, 2006. – С. 315-319.
2. Полилов Е.В., Зеленов А.Б. Уточнённый метод предельно допустимого времени работы механизма, предназначенный для расчёта мощности двигателей позиционных электроприводов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ. – 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 22-26.
3. Полилов Е.В., Зеленов А.Б. Минимизация мощности двигателей позиционных электроприводов путём вариации пуско-тормозных токов в соответствии с требуемой программой перемещений // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – Вип. 45. – С. 103-107.

Стаття надійшла 8.04.2007 р.