

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАГРАММЫ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО МИНИМУМУ ПОТЕРЬ ПРИ НЕИЗМЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОМЕНТАХ

**Введение.** На современном этапе развития и совершенствования технологических процессов предъявляются высокие требования не только к качеству переходных процессов, точностным характеристикам, диапазону регулирования скорости электромеханических систем, но и к их энергетическим показателям. Вопрос энергосбережения становится все более актуальным. В современном производстве весьма широко используются позиционные электроприводы, в которых на этапах пуска и торможения осуществляется стабилизация динамического момента (тока), а заданное перемещение обрабатывается по трапецеидальному или треугольному тахограммам. Темпы разгона и торможения при этом, как правило, выбираются, исходя из наиболее полного использования динамических возможностей электрической машины, что позволяет получить малое время обработки заданного перемещения, но это не всегда оправдано с энергетической точки зрения. Зачастую без нарушения технологических требований ко времени обработки заданного перемещения можно выбрать более рациональный с точки зрения энергетики режим работы позиционного механизма.

**Анализ предыдущих исследований.** В [1] авторами показано, что при обработке заданного перемещения по треугольной тахограмме потери в якорной цепи машины пропорциональны отношению времен обработки в третьей степени (без учета статической нагрузки). При учете последней выяснилось, что зависимость потерь от времени обработки перемещения имеет экстремальный характер. В [2] показано, что потребление реактивной энергии не растет, а снижается, несмотря на то, что при снижении темпов разгона и торможения уменьшается среднее значения косинуса угла управления за цикл. Это объясняется более быстрым темпом снижения потребляемой из сети энергии по сравнению с ростом угла регулирования. В [3] показано, что более выгодной по минимуму потерь в якорной цепи является не треугольная, а трапецеидальная тахограмма. Но установившаяся скорость на такой тахограмме должна определяться не максимальной допустимой скоростью машины (традиционный подход), а рассчитываться, исходя из величины обрабатываемого перемещения и допустимого времени его обработки.

**Цель работы.** Получение расчетных соотношений для определения режимов обработки заданных перемещений при минимуме потерь в якорной цепи позиционных электроприводов, работающих со стабилизацией момента (тока) при пуске и торможении.

**Материал и результаты исследований.** При обработке заданного перемещения по трапецеидальной тахограмме (рис.1) потери в якорной цепи могут быть определены следующим выражением:

$$\Delta A = (\lambda_{\bar{a}} + \lambda_{\bar{n}})^2 \cdot I_{\bar{a}}^2 \cdot R_{\bar{y}\Sigma} \cdot t_{\bar{r}} + \lambda_{\bar{n}}^2 \cdot I_{\bar{n}}^2 \cdot R_{\bar{y}\Sigma} \cdot t_{\bar{o}} + (\lambda_{\bar{a}} - \lambda_{\bar{n}})^2 \cdot I_{\bar{a}}^2 \cdot R_{\bar{y}\Sigma} \cdot t_{\bar{o}}, \quad (1)$$

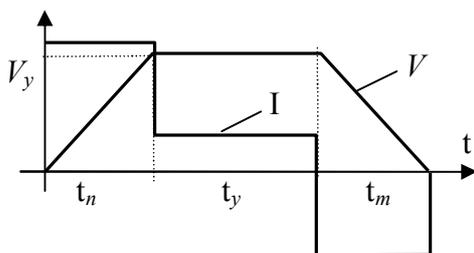


Рис.1. Нагрузочная диаграмма и тахограмма

где  $\lambda_{\bar{a}} = I_{\bar{a}}/I_i = \dot{I}_{\bar{a}}/\dot{I}_i$ ,  $\lambda_{\bar{n}} = I_{\bar{n}}/I_i = \dot{I}_{\bar{n}}/\dot{I}_i$  - кратности динамического  $I_{\bar{a}}$  ( $M_{\bar{a}}$ ) и статического  $I_{\bar{n}}$  ( $M_{\bar{n}}$ ) токов (моментов) машины;  $I_i, \dot{I}_i$  - номинальный ток и момент;  $R_{\bar{y}\Sigma}$  - суммарное сопротивление якорной цепи;  $t_{\bar{r}}, t_{\bar{o}}, t_{\bar{d}}$  - соответственно время пуска, установившегося движения и торможения.

Для рассматриваемого случая стабилизации динамического тока (момента) времена пуска и торможения равны, поэтому, введя общее обозначение для времени переходного процесса  $t_{\bar{r}} = t_{\bar{o}} = t_{\bar{r}\bar{i}}$ , после несложных преобразований из (1) получим следующее выражение:

$$\Delta A = [2(\lambda_{\bar{a}} + \lambda_{\bar{n}})^2 \cdot t_{\bar{r}\bar{i}} + \lambda_{\bar{n}}^2 \cdot t_{\bar{o}}] \cdot I_{\bar{a}}^2 \cdot R_{\bar{y}\Sigma}. \quad (2)$$

Естественно, что площадь трапеции на рисунке 1 соответствует заданному перемещению  $S_{\bar{c}}$ , которое может быть связано с приведенной тахограммой следующим выражением:

$$S_{\bar{c}} = V_{\bar{o}} \cdot \frac{t_{\bar{r}\bar{i}}}{2} + V_{\bar{o}} \cdot t_{\bar{o}} + V_{\bar{o}} \cdot \frac{t_{\bar{o}}}{2} = V_{\bar{o}} \cdot (t_{\bar{r}\bar{i}} + t_{\bar{o}}), \quad (3)$$

где установившееся значение скорости  $V_{\bar{o}}$  может быть связано с кратностью динамического тока  $\lambda_{\bar{a}}$  и временем переходного процесса  $t_{\bar{r}\bar{i}}$  следующим образом:

$$V_{\bar{o}} = \lambda_{\bar{a}} \cdot \dot{a}_i \cdot t_{\bar{r}\bar{i}}. \quad (4)$$

В выражении (4) через  $\dot{a}_i$  обозначено линейное ускорение, соответствующее номинальному моменту (току) машины. Подставив (4) в (3), получим выражение, определяющее время установившегося движения:

$$t_0 = \frac{S_c}{\lambda_{\bar{a}} \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}} - t_{i1}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (2), получим выражение, определяющее потери в якорной цепи машины  $\Delta A$  с заданным перемещением  $S_c$  позиционного механизма:

$$\Delta A = \left[ 2(\lambda_{\bar{a}} + \lambda_{\bar{n}})^2 \cdot t_{i1} + \lambda_{\bar{n}}^2 \cdot \left( \frac{S_c}{\lambda_{\bar{a}} \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}} - t_{i1} \right) \right] \cdot I_1^2 \cdot R_{\Sigma}. \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет потери в якорной цепи машины  $\Delta A$ , как функцию двух переменных: кратности динамического тока (момента)  $\lambda_{\bar{a}}$  и времени переходного процесса  $t_{i1}$ . Исследуем данную функцию на экстремум:

$$\begin{cases} \frac{\Delta A}{\partial \cdot t_{i1}} = 0 \\ \frac{\Delta A}{\partial \cdot \lambda_{\bar{a}}} = 0 \end{cases} = \begin{cases} \left[ 2(\lambda_{\bar{a}} + \lambda_{\bar{n}})^2 - \lambda_{\bar{n}}^2 \cdot \left( \frac{S_c}{\lambda_{\bar{a}} \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}^2} + 1 \right) \right] \cdot I_1^2 \cdot R_{\Sigma} = 0 \\ 4 \cdot \lambda_{\bar{a}} \cdot t_{i1} - \lambda_{\bar{n}}^2 \cdot \frac{S_c}{\lambda_{\bar{a}}^2 \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}} \cdot I_1^2 \cdot R_{\Sigma} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений показывает, что функция (6) имеет экстремум в точке с координатами:

$$\lambda_{\bar{a}}^* = \frac{\lambda_{\bar{n}}}{\sqrt{2}}; \quad t_{i1}^* = \sqrt{\frac{S_c}{\sqrt{2} \cdot \lambda_{\bar{n}} \cdot \dot{a}_i}}. \quad (8)$$

Дальнейшие исследования функции двух переменных (6) показали, что найденный экстремум является минимумом, т.е. при задании динамического тока с кратностью  $\lambda_{\bar{a}}^*$  и длительности пуска и торможения  $t_{i1}^*$  при отработке перемещения  $S_c$  в якорной цепи приводной машины будет теряться минимум энергии. Найдем также значения длительности установившегося движения и величины установившейся скорости, соответствующие данному экстремуму. Подставив (8) в (5) и (4) получим:

$$t_0^* = \frac{S_c}{\lambda_{\bar{a}}^* \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}^*} - t_{i1}^* = \frac{S_c - \lambda_{\bar{a}}^* \cdot \dot{a}_i \cdot (t_{i1}^*)^2}{\lambda_{\bar{a}}^* \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}^*} = \frac{1/2 \cdot S_c}{\sqrt{\lambda_{\bar{a}}^* \cdot \dot{a}_i \cdot S_c}} = \sqrt{\frac{S_c}{2 \cdot \lambda_{\bar{a}}^* \cdot \dot{a}_i}} = \sqrt{\frac{S_c}{\sqrt{2} \cdot \lambda_{\bar{n}} \cdot \dot{a}_i}}, \quad (9)$$

$$V_0^* = \lambda_{\bar{a}}^* \cdot \dot{a}_i \cdot t_{i1}^* = \frac{\lambda_{\bar{n}}}{\sqrt{2}} \cdot \dot{a}_i \cdot \sqrt{\frac{S_c}{\sqrt{2} \cdot \lambda_{\bar{n}} \cdot \dot{a}_i}} = \sqrt{\frac{S_c \cdot \dot{a}_i \cdot \lambda_{\bar{n}}}{\sqrt{8}}}. \quad (10)$$

Сравнивая (8) и (9) можно сделать вывод, что при осуществлении движения по найденной оптимизированной по минимуму потере тахограмме должно соблюдаться условие:

$$t_i^* = t_0^* = t_0^* = \sqrt{\frac{S_c}{\sqrt{2} \cdot \lambda_{\bar{n}} \cdot \dot{a}_i}}. \quad (11)$$

При этом общее время, затрачиваемое на осуществление перемещения  $S_c$ , составит:  $t_s = 3 \cdot \sqrt{\frac{S_c}{\sqrt{2} \cdot \lambda_{\bar{n}} \cdot \dot{a}_i}}$ .

**Выводы.** В статье показано, что отработка перемещения позиционным механизмом с минимальными потерями в двигателе происходит при трапецеидальной тахограмме с одинаковыми продолжительностями разгона, установившегося движения и торможения. Данный результат справедлив при неизменности динамических моментов. Получены выражения для определения динамического момента, времени отработки перемещения и уровня установившейся скорости в зависимости от значения требуемого перемещения.

#### Литература.

1. Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах // *Электромашиностроения та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика"*. – К.: Техніка, 2006. – С.315-319.
2. Зеленев А.Б., Полилов Е.В., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Потребление реактивной энергии позиционными электроприводами постоянного тока // *Вестник Кременчугского государственного политехнического ун-та им. М. Остроградского*. – Кременчуг: КГПУ. – Вып. 3/2007 (44), Ч1. – С. 76-78.
3. Зеленев А.Б., Полилов Е.В., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах (часть 2) // *Вестник Кременчугского государственного политехнического ун-та им. М. Остроградского*. – Кременчуг: КГПУ. – Вып. 3/2007 (44), Ч2. – С. 82-87.