

РАСЧЕТ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ОПТИМАЛЬНОЕ ПО ТЕПЛОВЫМ ПОТЕРЯМ УПРАВЛЕНИЕ

Толочко О.И., Розкаряка П.И.

Донецкий национальный технический университет

Введение. Задачи энергосбережения средствами электропривода становятся все более актуальными при общей тенденции роста цен на энергоносители. В позиционных электроприводах, работающих в повторно-кратковременном режиме, даже незначительное увеличение времени отработки перемещения позволяет существенно снизить величину тепловых потерь от динамической составляющей тока якоря для приводов постоянного тока или от моментобразующей составляющей тока статора в системах векторного управления приводом переменного тока [1-3]. Большое количество публикаций [4-9] посвящено вопросам рационального выбора желаемых законов изменения координат позиционных приводов и разработке алгоритмов формирования соответствующих управляющих воздействий. При сравнении различных законов управления позиционными механизмами чаще всего анализируют только величину тепловых потерь при нулевом статическом моменте M_c на валу двигателя. В работах [1, 2, 10] показано, что, наряду с тепловыми потерями, необходимо рассчитывать и анализировать еще и величину механической мощности, затрачиваемой на совершение полезной работы. Суммируя оба эти показателя, можно оценить величину энергопотребления системы и выбрать, если это позволяют технологические условия, время отработки заданного перемещения из условия минимума потребляемой электроэнергии. В [1] задача минимизации энергопотребления решена только для случая перемещения по треугольной тахограмме.

Целью данной работы является расчет энергопотребления позиционного электропривода постоянного тока, реализующего оптимальное по тепловым потерям управление с учетом ограничения на ускорение и (или) скорость при наличии на валу исполнительного механизма постоянного момента статического сопротивления.

Материал и результаты исследования. Рассмотрим диаграмму отработки перемещения (рис. 1), которую можно условно разделить на 5 участков; t_1 – разгон с постоянным ускорением, t_2 – разгон с линейно убывающим ускорением, t_3 – движение с установившейся скоростью, t_4 – торможение с линейно возрастающим ускорением, t_5 – торможение с постоянным ускорением. На ней и далее в тексте обозначены: ϵ , ω , φ – ускорение, скорость и перемещение; U , E_d , I_a – напряжение, ЭДС и ток якоря двигателя; R_a – сопротивление якорной цепи; M_j , I_j , M_c , I_c – динамическая и статическая составляющие момента и тока якоря; J – приведенный к валу двигателя момент инерции привода, t_0 – время отработки перемещения, равное сумме времен длительности перечисленных выше участков, с учетом того, что некоторые из них могут отсутствовать).

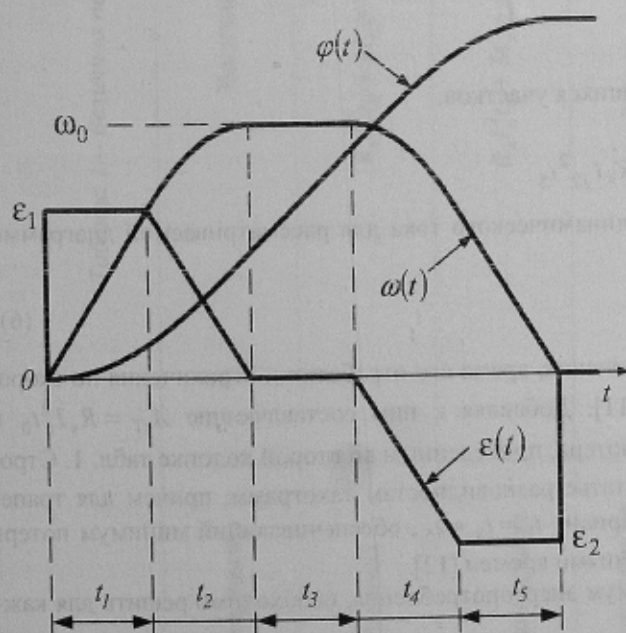


Рисунок 1 – Диаграмма отработки перемещения

Если при формировании диаграммы рис.1 учтены ограничения по скорости и ускорению (динамическому току), то $t_2 = t_4$, $t_1 = t_5$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_0$ ($I_{j1} = I_{j2} = I_{j0}$), и диаграмма становится симметричной.

В общем случае такая диаграмма охватывает следующие варианты тахограмм:

- треугольная – участки t_2 , t_3 , t_4 отсутствуют;
- трапецидальная – отсутствуют участки t_2 , t_4 ;
- параболическая без ограничений – без участков t_1 , t_3 , t_5 ;
- параболическая с ограничением скорости – отсутствуют участки t_1 , t_5 ;
- параболическая с ограничением тока при разгоне и торможении – без участка t_3 ;
- параболическая с ограничением скорости и тока как при разгоне так и при торможении (все участки присутствуют).

Электроэнергия, потребляемая из сети

$$A = \int_0^{t_0} U(t) I_a(t) dt = A_M + A_T, \quad (1)$$

расходуется на механическую работу

$$A_M = \int_0^t E_{\text{д}}(t) I_{\text{я}}(t) dt = \int_0^t \omega(t) M(t) dt \quad (2)$$

и тепловые потери в цепи якоря (потерями в обмотке возбуждения пренебрегаем)

$$A_T = \int_0^t I_{\text{я}}^2(t) R_{\text{я}} dt. \quad (3)$$

Разложим электромагнитный момент двигателя и пропорциональный ему (при постоянном потоке возбуждения $\Phi = \text{const}$) ток якоря на статическую и динамическую составляющие: $M(t) = M_j(t) + M_c$, $I_{\text{я}}(t) = I_j(t) + I_c$.

Тогда

$$A_M = \int_0^t \omega(t) M_j(t) dt + M_c \int_0^t \omega(t) dt,$$

$$A_T = \int_0^t I_{\text{я}}^2(t) R_{\text{я}} dt = \int_0^t (I_j(t) + I_c)^2 R_{\text{я}} dt = R_{\text{я}} \left(I_c^2 t + \int_0^t I_j^2(t) dt + 2I_c \int_0^t I_j(t) dt \right).$$

Учитывая, что $\int_0^t I_j(t) dt = \omega(t_0) = 0$, $\int_0^t \omega(t) dt = \Phi$ и $\int_0^t \omega(t) M_j(t) dt = 0$, окончательно имеем:

$$A_M = M_c \Phi, \quad (4)$$

$$A_T = R_{\text{я}} \left(I_c^2 t + \int_0^t I_j^2(t) dt \right) = A_{cT} + A_{jT} = R_{\text{я}} I_c^2 t_0 + R_{\text{я}} \int_0^t I_j^2(t) dt. \quad (5)$$

Найдем выражения для расчета тепловых потерь электроэнергии от действия динамической составляющей тока якоря A_{jT_i} на каждом из участков диаграммы рис.1 (i – номер участка), полагая, что механическая характеристика привода является абсолютно жесткой. Для участка t_1

$$A_{jT1} = R_{\text{я}} I_{j1}^2 t_1;$$

на участке t_2

$$I_j(t) = I_{j1} \left(1 - \frac{2}{t_2} t \right),$$

откуда

$$A_{jT2} = R_{\text{я}} \frac{I_{j1}^2}{3} t_2.$$

Аналогичным образом определяем A_{jT} для оставшихся участков:

$$A_{jT3} = 0; \quad A_{jT4} = R_{\text{я}} \frac{I_{j2}^2}{3} t_4; \quad A_{jT5} = R_{\text{я}} I_{j2}^2 t_5.$$

Таким образом, суммарные тепловые потери от динамического тока для рассматриваемой диаграммы составляют:

$$A_{jT} = 2R_{\text{я}} \left(I_{j0}^2 t_1 + \frac{1}{3} I_{j0}^2 t_2 \right). \quad (6)$$

Выражения для этих потерь через величину перемещения, время его отработки и ограничения по скорости и ускорению (динамическому току) выведены в [11]. Добавляя к ним составляющие $A_{cT} = R_{\text{я}} I_c^2 t_0$ и $A_M = M_c \Phi$, легко переходим к выражениям для полных потерь, приведенным во второй колонке табл. 1. Строки таблицы соответствуют рассматриваемым в данной статье разновидностям тахограмм, причем для трапецидальной тахограммы ($t_2 = t_4 = 0$) проанализирован вариант $t_1 = t_3 = t_5$, обеспечивающий минимум потерь от динамического тока по сравнению с другими соотношениями времен [12].

Для определения времени, обеспечивающего минимум энергопотребления, необходимо решить для каждой из диаграмм уравнения

$$\frac{dA}{dt_0} = 0$$

относительно времени t_0 . Результаты решения приведены в третьей колонке табл. 1.

Таблица 1 – Величина потребляемой электроэнергии и время достижения минимума

Тип диаграммы	Величина потерь	Время достижения минимума
треугольная	$R_x J_c^2 t_0 + M_c \Phi + 16 R_x \frac{J^2 \Phi^2}{(k\Phi)^2} t_0^3$	$t_{0 \text{ опт}} = 4 \sqrt{\frac{48 J^2 \Phi^2}{M_c^2}}$
трапециевидальная	$R_x J_c^2 t_0 + M_c \Phi + \frac{27}{2} R_x \frac{J^2 \Phi^2}{(k\Phi)^2} t_0^3$	$t_{0 \text{ опт}} = 4 \sqrt{\frac{81 J^2 \Phi^2}{2 M_c^2}}$
параболическая без ограничений	$R_x J_c^2 t_0 + M_c \Phi + 12 R_x \frac{J^2 \Phi^2}{(k\Phi)^2} t_0^3$	$t_{0 \text{ опт}} = 4 \sqrt{\frac{36 J^2 \Phi^2}{M_c^2}}$
параболическая с ограничением тока при разгоне и торможении	$R_x J_c^2 t_0 + M_c \Phi + R_x \frac{J^2}{(k\Phi)^2} \left(\varepsilon_0^2 t_0 - \varepsilon_0 \frac{2}{3} \sqrt{3 t_0 - 12 \frac{\Phi}{\varepsilon_0}} \right)$	$t_{0 \text{ опт}} = \frac{12 \Phi J^4 \varepsilon_0^4 + 24 \Phi J^2 \varepsilon_0^2 M_c^2 + 12 \Phi M_c^4 + J^4 \varepsilon_0^5}{3 \varepsilon_0 (J^4 \varepsilon_0^4 + 2 J^2 \varepsilon_0^2 M_c^2 + M_c^4)}$
параболическая с ограничением скорости	$R_x J_c^2 t_0 + M_c \Phi + \frac{16}{9} R_x \frac{J^2}{(k\Phi)^2} \omega_0 t_0 - \Phi$	$t_{0 \text{ опт}} = \frac{3 \Phi M_c + 4 J \omega_0}{3 M_c \omega_0}$
параболическая с ограничением скорости и тока как при разгоне так и при торможении	$R_x J_c^2 t_0 + M_c \Phi + R_x \frac{J^2}{(k\Phi)^2} \left(2 \varepsilon_0 \omega_0 - \frac{2}{3} \varepsilon_0 \sqrt{\omega_0^2 - \varepsilon_0} \sqrt{4 \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_0} - 3 \omega_0 t_0 + 3 \Phi} \right)$	$t_{0 \text{ опт}} = \frac{3 M_c^4 \omega_0^2 + 3 \Phi \varepsilon_0 M_c^4 + J^4 \varepsilon_0^4 \omega_0^2}{3 M_c^4 \omega_0}$

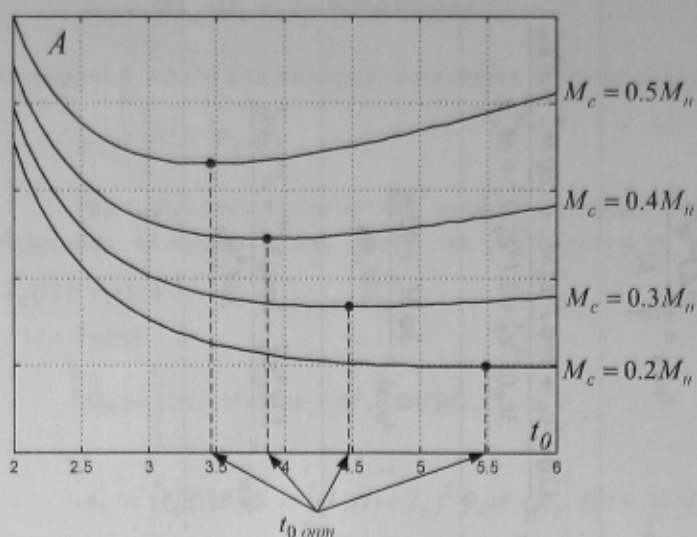


Рисунок 2 – Затраты электроэнергии от времени обработки перемещения

такой момент времени, обеспечивающий минимум потребления электроэнергии при обработке заданного перемещения, что необходимо использовать при формировании диаграмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах // *Электромашинобудування 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. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах (часть 2) // *Вестник КГПУ им. М. Остроградского*. – Кременчуг: КГПУ. – Вып. 3/2007 (44), Ч2. – С. 82-87.
3. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961. – 187 с
4. Сапсалъв А.В., Огнянников Е.В., Давыденко О.Б. Оптимальные взаимосвязи параметров циклических электроприводов с линейной диаграммой скорости // *Электроприводы переменного тока: Труды международной четырнадцатой научно-технической конференции*. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007, с 319-322
5. Тукалов И.О., Асмолова Л.В. Сравнительный анализ энергетических затрат при различных законах изменения скорости привода летучих ножниц // *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ*. – Харьков: ХГПУ, – 2001. – №10 – с. 360-362.
6. Чермалых А.В., Данилин А.В., Прядко С.П. Сравнительный анализ диаграмм управляющих воздействий электропривода, формируемых задающими моделями // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Кременчуг: КДПУ. – 2002. – №1 (12). –с. 13-17.
7. Денисова А.В., Сабинин Ю.А. Формирование задающего воздействия в позиционном электроприводе. // *Электротехника* №9 2002, с. 21-28.
8. Седов Ю.Г., Теличко Л.Я. Исследование параболического закона управления в позиционном электроприводе // *Известия вузов: Электромеханика* №4, 2004, с. 25-27.
9. Теличко Л.Я., Седов Ю.Г. Исследование косинусоидального и параболического законов позиционирования // *Известия вузов: Электромеханика* №3, 2005, с. 51-53.
10. Зеленев А.Б. Теория электропривода Часть I: Учебн. пособ./ А.Б. Зеленев. – Алчевск : ДГТУ, 2005. – 394 с.
11. Толочко О. И., Розкаряка П. И. Формирование оптимальных по нагреву диаграмм управления позиционным приводом с учетом ограничений на скорость и ускорение. // *Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія: "Електротехніка і енергетика"*, вип.41 : Донецьк: ДонДТУ, 2002, с 159-163.
12. Яблонь В.П., Морозов Д.И., Полилов Е.В. Оптимизация диаграммы позиционного электропривода по минимуму потерь при неизменных динамических моментах. // *Сборник научных трудов ДГТУ*. Днепропетровск: 2007, с 205-206.

Для примера на рис. 2 приведены графики потребляемой электроэнергии в функции времени обработки перемещения $A = f(t_0)$ при разных значениях I_c для самой простой из оптимальных по тепловым потерям диаграмм (строка 3 табл.1), подтверждающие правильность выведенных формул.

Выводы

1. Количество электроэнергии, расходуемой на перемещение позиционным электроприводом рабочего органа механизма с учетом величины статического момента по тахограммам, обеспечивающим оптимальное и квазиоптимальное управление по тепловым потерям можно вычислять по выведенным в данной статье формулам (табл.1)

2. Так же, как и для треугольной тахограммы, рассмотренной в работе [1], имеется