

Полученные переходные процессы показывают, что описанная структура электропривода обеспечивает высокое быстродействие и точность позиционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузиков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. — М., 1976. — 184 с.

УДК 62-83:681.513.5

Ю.В.ЛОПАТИН, В.Л.АНХИМЮК, д-р техн.наук,
В.И.ПАНАСЮК, д-р техн.наук, В.С.ЮДЕНКОВ (БПИ)

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО ПОЛНЫМ ПОТЕРЯМ УПРАВЛЕНИЕ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Динамика электропривода постоянного тока описывается дифференциальным уравнением в нормированной форме [1]

$$\frac{dv}{dt} = i\varphi - \mu, \quad \mu = \text{const},$$

где v — скорость вращения выходного вала двигателя; μ — момент статического сопротивления; i — ток якоря; φ — магнитный поток. На основе магистрального подхода [2] при ограничениях

$$v \leq v_{\max}, \quad |i| \leq i_m,$$

$$0 \leq \varphi \leq \varphi_m; \quad |\varphi \cdot v + i\rho| \leq u_m,$$

где u_m, i_m — максимальные напряжение и ток цепи якоря; ρ — активное сопротивление якоря, аналитически определен оптимальный по быстродействию

$$T = \int_0^T dt \rightarrow \min.$$

При заданных уровнях полных потерь

$$Q = \int_0^T (i^2\rho + \gamma_1\varphi^2 + \Delta P'_M) dt = \int_0^T \Delta P dt \leq Q_{\text{доп}},$$

$$\gamma_1 = \gamma\rho, \quad \Delta P'_M = \Delta P_M\rho, \quad \gamma = k + s(v),$$

где k — согласующий коэффициент; $s(v)$ — коэффициент, отражающий потери в стали; ΔP_M — слагаемое, отражающее механические потери, и производительности

$\theta = \int_0^T v dt = \theta_{\text{зад}}$ — позиционный процесс. Комплексный критерий качества выразим в виде

$$I = \int_0^T (\lambda_1 \Delta P + \lambda_2 - \lambda_3 v) dt =$$

$$= \int_0^T (\lambda_1' \Delta P' + \lambda_2 - \lambda_3 \nu) dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\Delta P' = i^2 + \gamma \varphi^2 + \Delta P_M, \quad \lambda_1' = \lambda_1 \rho,$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — неотрицательные весовые коэффициенты.

Решение находим из выражения

$$\{i_+^*, \varphi_+^*\} = \underset{i, \varphi}{\operatorname{argmin}} F^* \quad (2)$$

при $i\varphi - \mu > 0$ — для разгона, имеющего место при достижении ν значения ν_{II} , которое определяется условием

$$2\beta + \alpha \geq 0 \quad (3)$$

и по выражению

$$\{i_-^*, \varphi_-^*\} = \underset{i, \varphi}{\operatorname{argmin}} (-F^*) = \underset{i, \varphi}{\operatorname{argmax}} F^* \quad (4)$$

при $i\varphi < \mu$ — для торможения, где

$$F^* = \frac{i^2 + \varphi_1^2 + \alpha}{i\varphi_1 - \beta_1} \lambda_1' \sqrt{\gamma}, \quad \varphi_1 = \varphi \sqrt{\gamma}, \quad \beta = \mu \sqrt{\gamma},$$

$$\gamma = k + s(\nu) > 0; \quad \alpha = \Delta P_M + \frac{\lambda_2 - \lambda_3 \nu}{\lambda_1'}$$

При разгоне из (1) имеем

$$\varphi_+^* = \varphi_m,$$

$$i_+^* = \min \left\{ i_m, \frac{\mu}{\varphi_+^*} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\varphi_+^*}\right)^2 + (\varphi_+^*)^2 \gamma + \alpha} \right\}, \quad (5)$$

если $i_m \geq \varphi_m \sqrt{\gamma}$.

Если же $i_m < \varphi_m \sqrt{\gamma}$, то

$$i_+^* = i_m, \quad \varphi_+^* = \min \left\{ \varphi_m, \frac{\mu}{i_+^*} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{i_+^*}\right)^2 + \frac{(i_+^*)^2}{\gamma} + \frac{\alpha}{\gamma}} \right\}. \quad (6)$$

Когда $u > u_m$, то из условия $\frac{\partial F^*}{\partial i} = 0$ получаем

$$i_+^* = p + \sqrt{p^2 - q}, \quad \varphi_+^* = \frac{u_m - \rho i_+^*}{\nu}, \quad (7)$$

где

$$p = \frac{\mu \nu (\lambda_1' \nu^2 + b \rho^2) - \rho (c \nu^2 + b u_m^2)}{u_m (\lambda_1' \nu^2 - b \rho^2)},$$

$$q = \frac{2\mu b \rho \nu - c \nu^2 - b u_m^2}{\lambda_1' \nu^2 - b \rho^2}, \quad b = \gamma \lambda_1'; \quad c = \alpha \lambda_1'.$$

Режим торможения начинается с пассивной зоны $i_-^* = 0, \varphi_-^* = 0$, которая длится при снижении ν от $\nu = \nu_{\text{п}}$ до $\nu = \nu_{\text{к}}$, удовлетворяющего неравенству $\alpha \geq 2\beta$, и заканчивается активной зоной, где

$$\varphi_-^* = \varphi_m \quad i_-^* = \max \left\{ -i_m, \frac{\mu}{\varphi_-^*} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\varphi_-^*}\right)^2 + (\varphi_-^*)^2 \gamma + \alpha} \right\}, \quad (8)$$

а при невыполнении $i_m \geq \varphi_m \sqrt{\gamma}$

$$i_-^* = -i_m, \quad \varphi_-^* = \min \left\{ \varphi_m, \frac{\mu}{i_-^*} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{i_-^*}\right)^2 + \frac{(i_-^*)^2}{\gamma} + \frac{\alpha}{\gamma}} \right\} \quad (9)$$

при $|u| < u_m$. Если же $u \geq u_m$, то

$$i_-^* = p - \sqrt{p^2 - q}, \quad \varphi_-^* = \frac{u_m - i_-^* \rho}{\nu},$$

а в случае, если $u = -u_m$, то

$$i_-^* = \bar{p} - \sqrt{\bar{p}^2 - q}, \quad \varphi_-^* = \frac{-u_m - \rho i_-^*}{\nu}, \quad (10)$$

где $\bar{p} = -p$.

На основе полученных аналитических выражений φ и i при оптимальном управлении электроприводом предлагается следующий алгоритм, пригодный для микропроцессорной реализации.

Считаем, что первоначально определен признак участка разгона магистрали $k = 1$.

1-й шаг. Ввод $\theta_{\text{зад}}$ — обрабатываемый электроприводом угол, T_{T} — время обработки угла и определение $\lambda_2, \lambda_3, \Delta\theta_{\text{нт}}$ по заранее построенным таблицам, где $\Delta\theta_{\text{нт}}$ — угол начала торможения.

2-й шаг. Вычисление $\nu_{\text{п}}$, исходя из условия (3), и переход к следующему шагу.

3-й шаг. Если $\nu_{\text{п}} > \nu_{\text{max}}$, то корректировка λ_3 из условия, что $\nu_{\text{п}} = \nu_{\text{max}}$, вычисление $\nu_{\text{к}}$ из условия $-2\beta + \alpha \geq 0$. Переход к следующему шагу.

4-й шаг. Если $k > 0$, то переход к следующему шагу, иначе переход к шагу 13.

5-й шаг. Если $\nu_{\text{п}} < \nu_{\text{max}}$, то переход к следующему шагу, иначе переход к шагу 21.

6-й шаг. Если $\nu < \nu_{\text{п}}$, то переход к следующему шагу, иначе переход к шагу 12.

7-й шаг. Если $\rho i_+^* + \varphi_+^* \nu \leq u_m$, то переход к следующему шагу, иначе переход к шагу 11.

8-й шаг. Если $i_m \leq \varphi_m \sqrt{\gamma}$, то переход к следующему шагу, иначе переход к шагу 10.

9-й шаг. Вычисление i_+^*, φ_+^* по формулам (6), переход к шагу 18.

10-й шаг. Вычисление i_+^{**}, φ_+^{**} по формулам (5), переход к шагу 18.

11-й шаг. Вычисление i_+^*, φ_+^* по формулам (7), переход к шагу 18.

12-й шаг. $k = -1$ и переход к следующему шагу.

13-й шаг. Если $\nu = \nu_{\text{к}}$, то переход к следующему шагу, иначе — к шагу 15.

14-й шаг. $i_-^* = 0, \varphi_-^{**} = 0$ и к шагу 18.

15-й шаг. Если $i_-^* \leq 0$, то переход к следующему шагу, иначе – к шагу 7.

16-й шаг. Если $|\rho i_-^* + \nu \varphi_-^*| \leq u_m$, то к следующему шагу, иначе – к шагу 19.

17-й шаг. Вычисление i_-^* , φ_-^* по (10) и к шагу 18.

18-й шаг. Если $\nu < 0$, то $K = 1$ и к шагу 23, иначе – к шагу 4.

19-й шаг. Если $i_m \geq \varphi_m \sqrt{\gamma}$, то вычисление по формулам (8) и переход к шагу 18, иначе переход к следующему шагу.

20-й шаг. Вычисление i_-^* , φ_-^* по формулам (9) и переход к шагу 18.

21-й шаг. Если $\theta_{зад} - \theta - \Delta\theta_{нт} \leq 0$, то $K = -1$ и переход к шагу 13, иначе переход к следующему шагу.

22-й шаг. Вычисление φ^* из $\frac{\partial F}{\partial \varphi} = 0$, $i^2 = (\frac{\mu}{\varphi})^2$, где $F = \lambda'_1 \Delta P' + \lambda_2 - \lambda_3 \nu$ и $i^* = \frac{\mu}{\varphi^*}$. Откуда получаем

$$i^* = \frac{\mu}{\varphi^*}, \quad \varphi^* = \sqrt[4]{\frac{\mu^2}{\gamma}}$$

и переход к шагу 4.

23-й шаг. Останов.

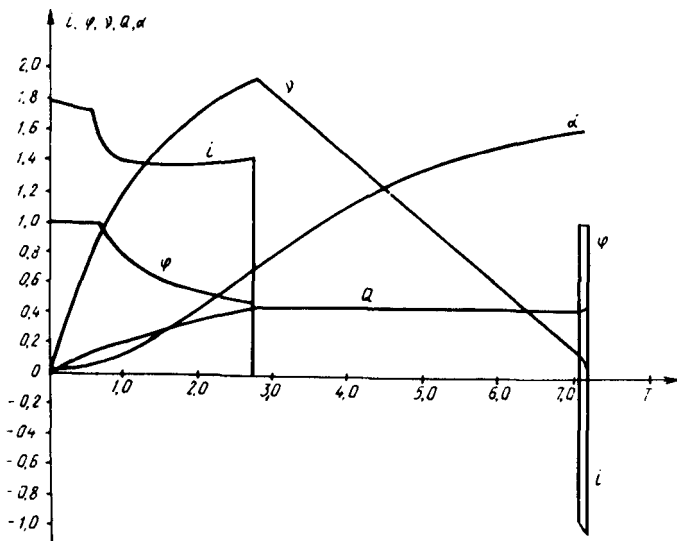


Рис. 1. График процесса позиционирования, оптимального по полным потерям.

Алгоритм справедлив при относительно малых моментах сопротивления, удонстворяющих условиям

$$\mu \leq \sqrt{\gamma} \varphi_m^2, \quad \mu \leq \frac{i_m^2}{\sqrt{\gamma}}.$$

По приведенному алгоритму составлена программа и проведено моделирование оптимального процесса на ЭВМ ЕС-1022. На рис. 1 представлен график из-

менения тока якоря, потока возбуждения, угловой скорости, угла поворота вала двигателя и полных потерь при оптимальном управлении в процессе позиционирования, полученный при $i_m = 3$; $\varphi_m = 1$; $u_m = 1,24$; $v_m = 2$; $\mu = 0,4$; $\Delta x = 0,001$; $\rho = 0,23$; $\Delta P_M = k_1 v$, где $k_1 = 0,05$; $\gamma = k + k_2 v^2$, где $k = 0,29$; $k_2 = 0,1$; $\rho_B = 1,158$; $\lambda'_1 = 1,4925$; $\lambda_2 = 0,8$; $\lambda_3 = 1,0$. Для этого процесса имеем $v_{II} = 1,9$; $v_K = 0,16$; $T_1 = 7,197$; $\theta_1 = 7,951$; $Q_1 = 2,28$.

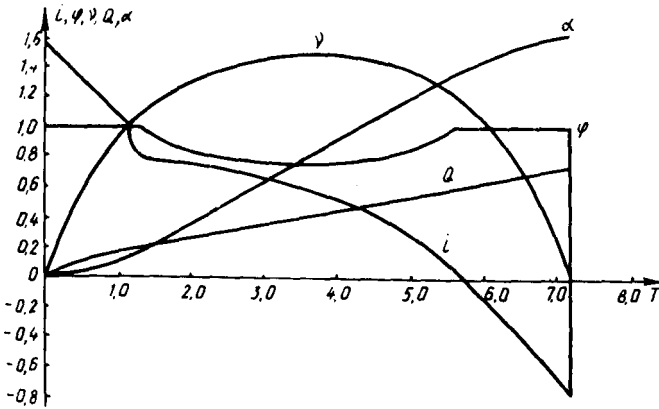


Рис. 2. График процесса позиционирования, учитывающего потери только в обмотке якоря.

Сравним процесс $i_2, \varphi_2, \theta_2, Q_2, v_2$, изображенный на рис. 2, оптимальный только по потерям в цепи якоря [1-3], который получен по тому же алгоритму, но при $\gamma = 0, \lambda_1 = 1,0; \lambda_2 = 1,2; \lambda_3 = 1,0$. Для этого процесса имеем $v_{II} = 1,48$; $T_2 = 7,197$; $\theta_2 = 7,946$; $Q_2 = 3,636$.

Видно, что этот процесс не имеет зоны свободного выбега, и при всех остальных параметрах, одинаковых с параметрами процесса на рис. 1 (T, θ), проигрывает ему по полным энергопотерям:

$$\Delta Q = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} 100\% = 37\%.$$

Кроме (1), динамика двигателя постоянного тока (ДПТ) описывается еще одним уравнением

$$u_B = i_B \rho_B + h \frac{d\varphi}{dt}, \quad (11)$$

где u_B, i_B, ρ_B, h — напряжение, ток, сопротивление и постоянная времени цепи возбуждения.

Считаем, что существует линейная зависимость

$$i_B = \beta_1 \varphi.$$

Тогда, вычисляя φ из (11), появляется возможность полного аналитического

решения задачи. Выражение для φ на участках согласования магистралей между собой имеет следующий вид:

$$\varphi = e^{-\int \frac{\beta_1 \rho_B}{h} dt} \left[c + \int \frac{u_B}{h} e^{\int \frac{\beta_1 \rho_B}{h} dt} dt \right].$$

Учет потерь энергии в цепи возбуждения на участках согласования магистралей увеличил на 0,5 % полные потери по отношению к энергопотерям всего процесса. Инерционностью цепи якоря пренебрегаем, так как влияние этого показателя на оптимальный процесс еще более незначительно.

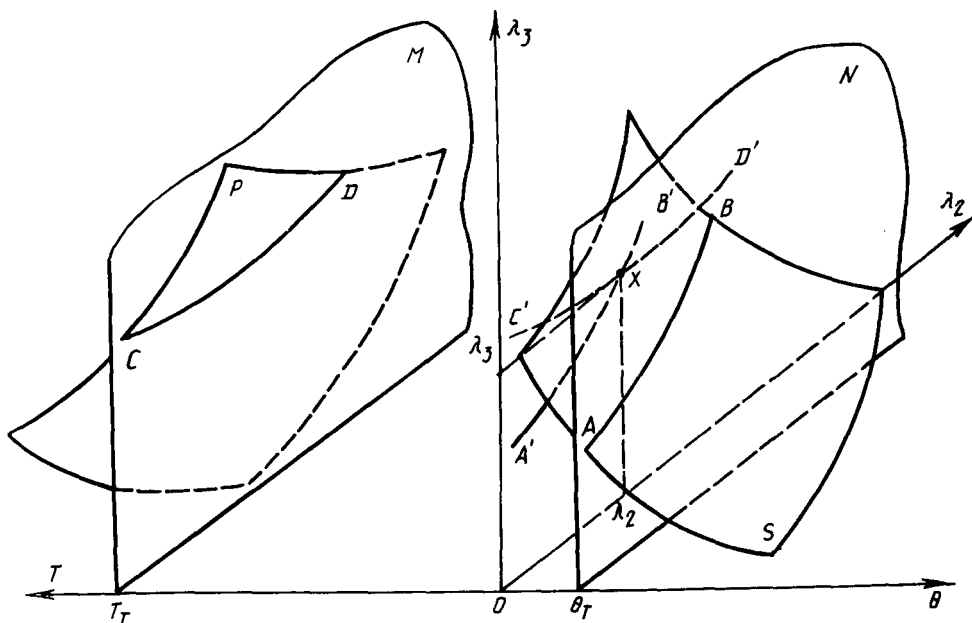


Рис. 3. Выбор весовых множителей.

При выборе неотрицательных весовых множителей один из них пронормируем, т.е. примем равным единице. Например, $\lambda'_1 = 1$. Тогда выбор значений λ_2 и λ_3 можно производить следующим образом. Путем моделирования с оптимальным регулятором строятся поверхности значений θ и T в функции от λ_2 и λ_3 (рис. 3). Затем по заданному углу θ_T и времени его отработки T_T полученные поверхности пересекаются плоскостями, параллельными плоскости, которая образуется осями λ_2, λ_3 . Далее находится точка пересечения проекций сечений этих поверхностей на плоскость параметров λ_2, λ_3 , определяющая значения λ_2, λ_3 . Эти значения соответствуют оптимальному позиционному процессу с θ_T и T_T при минимальных потерях Q .

В результате можно сделать ряд выводов.

Разработан алгоритм оптимального (по полным потерям энергии) управления электроприводом постоянного тока. Сравнение полученного оптимального процесса позиционирования с известным процессом показало значительное снижение энергопотерь (на 37 %). Это говорит о необходимости учета при оптимизации, кроме потерь в якоре, потерь в цепи возбуждения, в стали, а также механических.

Учет инерционности цепи возбуждения на эту оценку влияет незначительно (для рассматриваемого электропривода увеличение энергопотерь в пределах 0,5 %).

Приведем процедуру выбора весовых коэффициентов в критерии качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву. — Л., 1977. — 143 с. 2. Панасюк В.И. Управление потоком электропривода, оптимальное по полным потерям. — Изв. вузов СССР, 1982, № 7, с. 34–38. 3. Хамитов Ш.Ш. К вопросу определения оптимальных диаграмм тока двигателя постоянного тока. — Докл. АН СССР, 1959, т. 124, № 2, с. 34–38.

УДК 62–83:621.047–83

Г.П.КОМЛИК, канд.техн.наук,
КАИН ХУСЕЙН (БПИ)

ШАГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЫТЯГИВАНИЯ СЛИТКА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Разработка электропривода для механизма вытягивания слитка машины горизонтального непрерывного литья (МГНЛ) вызвана необходимостью совершенствовать существующие системы электроприводов с учетом особенностей технологического процесса.

Системы автоматизированного электропривода механизма вытягивания горизонтального слитка должны отличаться плавным изменением скорости слитка в широком диапазоне с определенным темпом разгона и торможения; поддержанием заданной скорости литья с точностью 0,5–1,0 % во всем диапазоне скоростей и нагрузок; обеспечением необходимых режимов работы МГНЛ (режимы "введение затравки", "вытягивание слитка" и ручной режим).

Особенностями работы электропривода в режиме "введение затравки" являются движение затравки с постоянной скоростью и необходимость реверсирования приводного двигателя. При "вытягивании слитка" происходит вытягивание затравки со слитком, отделение затравки и ее удаление и рабочий режим периодического вытягивания слитка, который может продолжаться длительное время. В ручном режиме производится опробование работы механизма вытягивания с электроприводом на холостом ходу.

В практике непрерывного литья все более широко используется режим вытягивания с повышенной частотой извлечения слитка и малым шагом. Такой режим способствует образованию мелкозернистой кристаллической