

ОПТИМИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Абуфанас А.С., Лобатый А.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
lobaty@tut.by

В системах мониторинга объектов, находящихся на земной поверхности, всё более широкое распространение получили беспилотные летательные аппараты (БЛА), предназначенные для решения различных задач, как в интересах народного хозяйства, так и для других организаций и ведомств. Задачи, стоящие перед системой мониторинга земной поверхности, подробно описаны в [1, 2].

Главной составляющей системы мониторинга является установленная на борту БЛА специальная аппаратура. Для обзора земной поверхности в нужном диапазоне волн устанавливается видеокамера или другая система (тепловизионная, радиотехническая), выходной информацией которой является изображение объектов, находящихся на земле.

Для управления угловым положением видеокамеры (или другой аппаратуры) применяется электропривод, изменяющий угловое положение видеокамеры в двух плоскостях относительно корпуса БЛА. Электропривод, как правило, работает в двух режимах: режиме поиска наземного объекта и режиме слежения за данным объектом.

Электропривод системы мониторинга как системы слежения относится к классу позиционных электроприводов (ПЭП) [3]. Такой электропривод перемещает рабочий орган (РО) из некоторой исходной позиции в некоторую конечную позицию с требуемой точностью остановки в ней. При этом траектория РО заранее известна, а временной закон перемещения РО может быть произвольным или задаваться по условиям работы системы мониторинга. Следящий электропривод (СЭП) осуществляет перемещение РО по некоторой траектории с требуемой точностью в любой точке траектории. Определяет траекторию и характер движения по ней некоторый задающий орган (ЗО), которым в данном случае может быть реально движущийся наземный объект слежения.

Электродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами имеют существенный недостаток – наличие щеточно-коллекторного узла, не обеспечивающий достаточную надежность привода системы мониторинга в сложных условиях эксплуатации БЛА (резкие перепады температуры, тряска, вибрации и т.п.). Решение является применение вентильных двигателей, у которых механический коммутатор заменен электронным (полупроводниковым). Простейшая функциональная схема вентильного двигателя представлена на рисунке 1, где обозначено: ДПР – датчик положения ротора. Для управления положением ротора в качестве управляющих сигналов на обмотки двигателя поступает последовательность импульсов. Принцип работы таких электроприводов подробно рассмотрен в [3, 4].

Передаточная функция вентильного электродвигателя по управляющему воздействию имеет вид [4]

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_{cp}(p)} = \frac{K_d}{T_d(p) - 1}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, U_{cp} – среднее управляющее напряжение, K_d и T_d – соответственно, обобщенный коэффициент усиления и постоянная времени, зависящие от конструктивных особенностей электродвигателя.

Рассмотрим оптимизацию управления электродвигателем по заданному критерию, учитывающему как точность перевода рабочего органа в течение некоторого конечного времени

$t_k - t_0$ из начального положения в конечное, так и интегральные потери на управление в течение времени $t_k - t_0$.

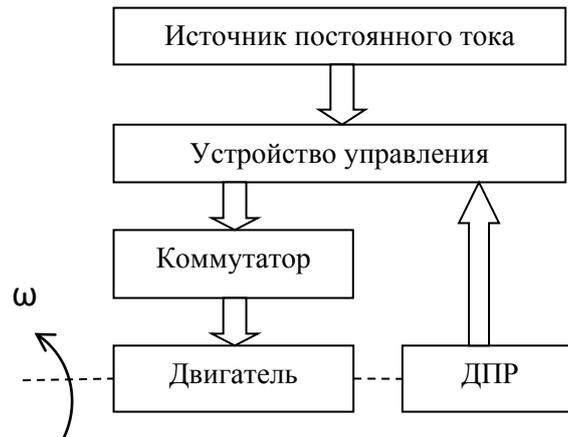


Рисунок 1. – Функциональная схема вентильного электродвигателя

Передаточной функции (1) соответствует система дифференциальных уравнений

$$\dot{\varphi} = \omega, \quad \varphi(t_0) = \varphi_0, \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{T_d} \omega + \frac{K_d}{T_d} U_{cp}, \quad \omega(t_0) = \omega_0. \quad (3)$$

Представим минимизируемый функционал качества в виде

$$J_0 = d_1 \varphi^2(t_k) + d_2 \omega^2(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} [q_1 \varphi^2(t) + q_2 \omega^2(t) + pu^2(t)] dt. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой квадратичный функционал Летова-Калмана [5], в котором $u(t) = U_{cp}$ – искомое управление. Минимизация функционала (4) при ограничениях в виде уравнений (2)-(3) представляет собой задачу аналитического конструирования оптимального регулятора [6]. Коэффициенты функционала (4) выбираются из условий нормировки возможными максимальными значениями соответствующих переменных [7]. $d_1 = 1/\varphi_{\max}^2$, $d_2 = 1/\omega_{\max}^2$, $q_1 = 1/(t_k - t_0)\varphi_{\max}^2$, $q_2 = 1/(t_k - t_0)\omega_{\max}^2$, $p = 1/(t_k - t_0)u_{\max}^2$.

В данном случае выражение для оптимального управления имеет вид [5-7]

$$u_{\text{опт}} = -p^{-1}b(\Lambda_{12}\varphi + \Lambda_{22}\omega), \quad (5)$$

где обозначено $b = K_d/T_d$. Коэффициенты Λ_{12} и Λ_{22} - определяются путем решения дифференциальных уравнений

$$\dot{\Lambda}_{11} = -2a_{11}\Lambda_{11} - 2a_{21}\Lambda_{12} + 2\Lambda_{21}pb^2\Lambda_{11}^2 - q_1, \quad (6)$$

$$\dot{\Lambda}_{12} = -(a_{22} + a_{11})\Lambda_{12} - a_{12}\Lambda_{11} - a_{21}\Lambda_{22} + pb^2\Lambda_{12}\Lambda_{22}, \quad (7)$$

$$\dot{\Lambda}_{22} = -2a_{12}\Lambda_{12} - 2a_{22}\Lambda_{22} + 2pb^2\Lambda_{22}^2 - q_2. \quad (8)$$

В уравнениях (6)-(8) принято, что $\Lambda_{21} = \Lambda_{12}$ и заданы конечные условия $\Lambda_{11}(t_k) = d_1$, $\Lambda_{12}(t_k) = 0$, $\Lambda_{22}(t_k) = d_2$. Коэффициенты a_{ij} для модели объекта управления вида (2)-(3) равны следующим значениям: $a_{11}=0$, $a_{12}=1$, $a_{21}=0$, $a_{22}=-1/T_d$.

Дифференциальные уравнения (6)-(8) необходимо решать в «обратном времени», изменив знаки в правых частях дифференциальных уравнений на противоположные и считая конечные условия начальными на интервале оптимизации $[t_k - t_0]$.

Путем математического моделирования в среде Mathcad для математической модели гипотетического электропривода (2)-(3) и функционала качества (4) проведено исследование оптимального управления (5). На рисунках 2 представлены графики изменения $\varphi(t)$ и $\omega(t)$.

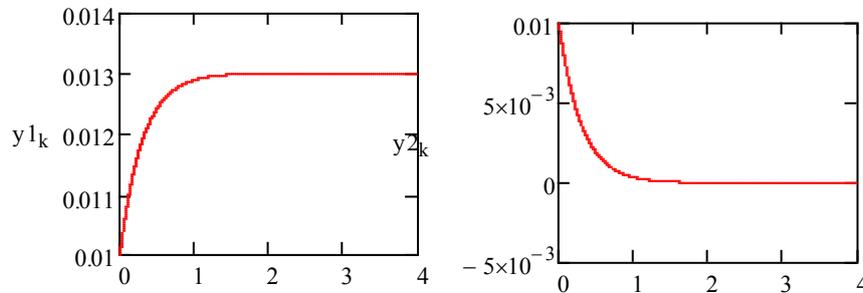


Рисунок 2 – Графики изменения $\varphi(t)$ и $\omega(t)$

Для определения параметров управляющих импульсов, поступающих на электродвигатель, применим следующий прием. Управляющий сигнал представим в виде последовательности импульсов.

$$u(t) = u_{\text{опт}}(t) = \sum_{i=0}^n \mu_i(Y, t) \delta(t - t_i), \quad (9)$$

где $\delta(t - t_i)$ – δ -функции Дирака вида

$$\delta(t - t_i) = \begin{cases} 0, & t \neq t_i, \\ \infty, & t = t_i. \end{cases}$$

$\mu_i(Y, t)$ – функции, зависящие от времени и вектора фазовых координат системы $Y(t)$, t_i – момент времени появления i -го управляющего импульса.

Определив $u(t)$ на интервале оптимизации $[t_0, t_k]$, проинтегрируем выражение (9) по времени, считая, что на этом интервале имеется один прямоугольный управляющий импульс.

$$\int_{t_0}^{t_k} u(t) dt = \int_{t_0}^{t_k} \mu_i(Y, t) \delta(t - t_i) dt. \quad (10)$$

В соответствии с определением интеграла свертки вида (10) [9], имеем

$$\int_{t_0}^{t_k} u(t) dt = \mu_i(Y, t_i) = A_i t_i, \quad (11)$$

где A_i – амплитуда управляющего импульса на i -м интервале оптимизации, t_i – длительность управляющего импульса на i -м интервале. При заданной постоянной амплитуде $A_i = U_{\text{ср}}$ длительность управляющего импульса вычисляется по формуле

$$t_i = \frac{1}{A_i} \int_{t_0}^{t_k} u(t) dt. \quad (12)$$

Таким образом, управление электродвигателем постоянного тока осуществляется в данном случае последовательностью прямоугольных импульсов с постоянными амплитудой и периодом следования, но с переменной длительностью, зависящей от величины прогнозируемого на интервале оптимизации сигнала управления. Представлена качественная иллюстрация

эволюции оптимизируемых параметров управляемого электродвигателя. Данный подход может найти применение для решения широкого круга прикладных задач, решаемых БЛА [10], в которых применяются электродвигатели постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василин, Н.Я. Беспилотные летательные аппараты / Н.Я. Василин. – Минск: ООО «Попурри», 2003. – 272 с.
2. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2005. – 280 с.
3. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
4. Гульков, Г.И. Системы автоматического управления электроприводами / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Т.В. Бачило; под общ. Ред. Ю.Н. Петренко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2014. – 366 с.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 4 т.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
7. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю- ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
8. Абуфанас А.С. Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А.А. Лобатый, Ю.Н. Петренко Ю.Н., А. Эльзейн, А.С. Абуфанас А.С. // Наука и техника. - 2016. - № 4. - С. 322-328.
9. Теория систем автоматического управления / под. ред. В.Л. Бесекерского, Е.П. Попова. – М.: Изд. Санкт– Петербург, 2003. – 747 с.
10. Абуфанас, А.С. Оценка эффективности беспилотного авиационного комплекса на этапе наведения / А.С. Абуфанас, А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Доклады II международной научно-технической интернет-конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», БНТУ, 4 декабря 2014 г. [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/12576>.