

СИНТЕЗ ФИНИТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ

А.В. Стариков

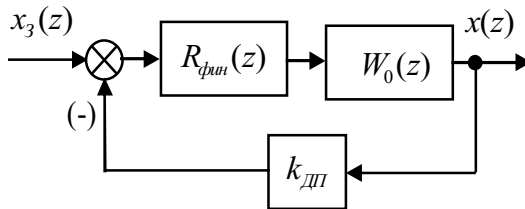
Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Синтезирован регулятор, обеспечивающий финитное управление электромагнитным подшипником. Показано, что применение такого регулятора обеспечивает переходные процессы, заканчивающиеся за пять тактов. В то же время в системе управления электромагнитным подшипником наблюдается большая статическая ошибка.

Ключевые слова: *финитный регулятор, дискретная передаточная функция, система управления, электромагнитный подшипник.*

В цифровых системах нашло применение так называемое финитное управление [1], позволяющее за строго фиксированное количество тактов, определяемое порядком знаменателя дискретной передаточной функции системы, перевести объект из одного состояния в другое. В этом случае при малых значениях периода дискретизации по времени будет наблюдаться высокое быстродействие системы при обработке как управляющих, так и возмущающих воздействий.

Синтезируем финитный регулятор для цифровой системы управления электромагнитным подшипником. При этом будем считать, что в системе используется только отрицательная обратная связь по перемещению ротора в поле электромагнитов. Тогда линеаризованная структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником будет выглядеть следующим образом (см. рисунок).



Линеаризованная структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником с финитным регулятором

На структурной схеме приняты следующие обозначения: $R_{фин}(z)$ – дискретная передаточная функция регулятора, обеспечивающего финитное управление; $W_0(z)$ – дискретная передаточная функция процесса перемещения ротора в поле электромагнитов с учетом экстраполятора нулевого порядка; $k_{ДП}$ – коэффициент передачи безынерционного датчика положения ротора; $x_3(z)$ – изображение задающего воздей-

ствия (как правило, равного нулю); $x(z)$ – изображение перемещения ротора; $z = e^{pT}$; p – комплексная переменная; T – период дискретизации по времени.

При управлении напряжениями на обмотках электромагнитов передаточная функция процесса перемещения ротора в поле электромагнитов как объекта управления [2]

$$W_{ov}(p) = \frac{x(p)}{N_x(p)} = \frac{k_{ШИМ}k_{ЭМ}}{k_F \left[\frac{mT_{\mathcal{E}}}{k_F} p^3 + \frac{m}{k_F} p^2 + \left(\frac{k_{ЭМ}k_E}{k_F U} - T_{\mathcal{E}} \right) p - 1 \right]},$$

где $N_x(p)$ – изображение управляющего сигнала на входе силового преобразователя; $k_{ШИМ}$ – коэффициент передачи широтно-импульсного модулятора; U – опорное напряжение силового преобразователя; $k_{ЭМ}$ – коэффициент передачи, связывающий силу, действующую на ротор со стороны электромагнитов при его центральном положении, с соотношением токов в электромагнитах; k_F – коэффициент передачи, характеризующий изменение силы, действующей на ротор, при его отклонении от центрального положения; m – масса ротора; $T_{\mathcal{E}}$ – постоянная времени электрической цепи обмоток электромагнитов; k_E – коэффициент передачи, определяющий приращение наводимой в обмотках электромагнитов э.д.с. со скоростью перемещения ротора в магнитном поле.

С учетом того, что широтно-импульсный модулятор кроме преобразования входного кода в скважность выполняет функцию экстраполятора нулевого порядка, дискретная передаточная функция объекта [3]

$$W_0(z) = \frac{a_1 z^2 + b_1 z + c_1}{z^3 + a_{11} z^2 + a_{22} z + a_{33}},$$

где a_1 , b_1 , c_1 , a_{11} , a_{22} и a_{33} – коэффициенты, зависящие от параметров электромагнитов, ротора и силового преобразователя.

Дискретную передаточную функцию цифрового регулятора, обеспечивающего финитное управление в рассматриваемой системе управления электромагнитным подшипником, будем искать в виде

$$R_{\text{фин}}(z) = \frac{g_0 z^2 + g_1 z + g_2}{z^2 + r_1 z + r_2}. \quad (1)$$

Для определения неизвестных коэффициентов g_0 , g_1 , g_2 , r_1 и r_2 найдем дискретную передаточную функцию замкнутой системы:

$$W(z) = \frac{x(z)}{x_3(z)} = \frac{b_{00} z^4 + b_{01} z^3 + b_{02} z^2 + b_{03} z + b_{04}}{z^5 + a_{01} z^4 + a_{02} z^3 + a_{03} z^2 + a_{04} z + a_{05}}, \quad (2)$$

где $b_{00} = a_1 g_0$; $b_{01} = b_1 g_0 + a_1 g_1$; $b_{02} = c_1 g_0 + b_1 g_1 + a_1 g_2$; $b_{03} = c_1 g_1 + b_1 g_2$; $b_{04} = c_1 g_2$; $a_{01} = r_1 + a_{11} + a_1 k_{\text{ДП}} g_0$; $a_{02} = a_{22} + a_{11} r_1 + r_2 + k_{\text{ДП}} (b_1 g_0 + a_1 g_1)$; $a_{03} = a_{33} + a_{22} r_1 + a_{11} r_2 + k_{\text{ДП}} (c_1 g_0 + b_1 g_1 + a_1 g_2)$; $a_{04} = a_{33} r_1 + a_{22} r_2 + k_{\text{ДП}} (c_1 g_1 + b_1 g_2)$; $a_{05} = a_{33} r_2 + c_1 k_{\text{ДП}} g_2$.

Финитное управление требует, чтобы знаменатель передаточной функции (2) имел только нулевые корни, то есть необходимо, чтобы

$$W(z) = \frac{b_{00}z^4 + b_{01}z^3 + b_{02}z^2 + b_{03}z + b_{04}}{z^5}.$$

Для выполнения этого условия приравняем нулю все коэффициенты знаменателя (2) при степенях z ниже пятой. В результате получим систему пяти уравнений, связывающих между собой параметры регулятора с коэффициентами дискретной передаточной функции объекта управления:

$$\left. \begin{aligned} r_1 + a_{11} + a_1 k_{дп} g_0 &= 0; \\ a_{22} + a_{11} r_1 + r_2 + k_{дп} (b_1 g_0 + a_1 g_1) &= 0; \\ a_{33} + a_{22} r_1 + a_{11} r_2 + k_{дп} (c_1 g_0 + b_1 g_1 + a_1 g_2) &= 0; \\ a_{33} r_1 + a_{22} r_2 + k_{дп} (c_1 g_1 + b_1 g_2) &= 0; \\ a_{33} r_2 + c_1 k_{дп} g_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Решая систему (3) относительно переменных g_0 , g_1 , g_2 , r_1 и r_2 , найдем настройки цифрового регулятора, обеспечивающего финитное управление электромагнитным подшипником:

$$g_2 = \frac{\Sigma_2 \Sigma_6 + \Sigma_3 \Sigma_5}{\{\Sigma_4 \Sigma_5 - [a_1 a_{33} (b_1 - a_1 a_{11}) + c_1 \Sigma_1] \Sigma_2\} k_{дп}},$$

где $\Sigma_1 = c_1 + a_1 a_{11}^2 - a_1 a_{22} - b_1 a_{11}$;

$$\Sigma_2 = (b_1 - a_1 a_{11})(a_1 a_{33} + b_1 a_{22} - a_1 a_{11} a_{22}) + (c_1 - a_1 a_{22}) \Sigma_1;$$

$$\Sigma_3 = (a_1 a_{33} + b_1 a_{22} - a_1 a_{11} a_{22})(2a_1 a_{22} - a_{33} - a_{11}^3) - (a_{11}^2 a_{22} - a_{11} a_{33} - a_{22}^2) \Sigma_1;$$

$$\Sigma_4 = a_1 (a_1 a_{33} + b_1 a_{22} - a_1 a_{11} a_{22}) + b_1 \Sigma_1; \quad \Sigma_5 = a_{33} [(b_1 - a_1 a_{11})^2 - a_1 \Sigma_1];$$

$$\Sigma_6 = a_{33} [(a_{11}^2 - a_{22}) \Sigma_1 - (b_1 - a_1 a_{11})(2a_1 a_{22} - a_{33} - a_{11}^2)];$$

$$g_1 = \frac{\Sigma_3 - k_{дп} \Sigma_4 g_2}{k_{дп} \Sigma_2}; \quad g_0 = \frac{2a_{11} a_{22} - a_{33} - a_{11}^3 - (b_1 - a_1 a_{11}) k_{дп} g_1 - a_1 k_{дп} g_2}{k_{дп} \Sigma_1};$$

$$r_2 = a_{11}^2 - a_{22} - (b_1 - a_1 a_{11}) k_{дп} g_0 - a_1 k_{дп} g_1; \quad r_1 = -(a_{11} + a_1 k_{дп} g_0).$$

Моделирование электромагнитного подшипника с регулятором вида (1) в программной среде Matlab Simulink показывает, что переходные процессы в системе заканчиваются за пять тактов, то есть действительно наблюдается финитное управление. В то же время в рассматриваемой системе наблюдается статическая ошибка положения ротора. Например, в электромагнитном подшипнике, разработанном для ротора с массой $m = 36$ кг, при периоде дискретизации $T = 0,01$ с смещение ротора от центрального положения под действием собственного веса составит $\Delta x = 0,337$ мм. Это объясняется тем, что регулятор (1) представляет собой статический импульсный фильтр. Аналогичные результаты получаются и при синтезе финитного регулятора в системе управления электромагнитным подшипником, использующей две обратные связи: по положению ротора и току в обмотках электромагнитов [4]. Поэтому можно сказать, что применение принципа финитного управления при разработке электромагнитного подшипника сталкивается с проблемой обеспечения требуемой точности поддержания ротора в центральном положении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Цыпкин Я.З.* Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
2. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
3. *Стариков С.А.* Влияние квантования по времени на свойства цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – № 1 (33). – 2012. – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 165-174.
4. *Журавлев Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2012 г.

SYNTHESIS OF THE FINITE REGULATOR FOR THE CONTROL SYSTEM BY THE ELECTROMAGNETIC BEARING

A. V. Starikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The regulator providing the finite control by the electromagnetic bearing is synthesized. It is shown that application such a regulator provides the transients which are coming to an end for five steps. At the same time in a control system of the electromagnetic bearing the big static error is observed.

Keywords: *the finite regulator, discrete transfer function, a control system, the electromagnetic bearing*