Повышение точности следящих систем при использовании компенсирующих связей по возмущающим воздействиям

Рассмотрим систему, замкнутую единичной отрицательной обратной связью. В прямой цепи этой системы находятся последовательно соединённые регулятор, обладающий передаточной функцией $W_P(s)$, и объект управления (ОУ), имеющий передаточную функцию $W_0(s)$. На ОУ действует возмущающее воздействие $F(t)$.

Определим влияние этого воздействия на ошибку системы $\varepsilon(t)$. Для упрощения анализа приведем это воздействие ко входу ОУ, сформировав воздействие $u_F(t)$, отвечающее уравнению

$$U_F(s) = W_F(s)F(s),$$

где $U_F(s)$ и $F(s)$ – изображения по Лапласу переменных $u_F(t)$ и $F(t)$ соответственно; $W_F(s)$ – передаточная функция, отражающая специфику ОУ. Передаточная функция $W_F(s)$ выбирается таким образом, что воздействие $u_F(t)$ вызывает такую же реакцию ОУ, что и исходное воздействие $F(t)$.

Например, если объектом управления является двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, управляемый силовым преобразователем, то возмущающим воздействием является момент внешних сил, действующий на вал двигателя, а передаточная функция $W_F(s)$ имеет вид

$$W_F(s) = \frac{R_Я}{k_M k_{ПР}}(T_Э s + 1)(T_{ПР} s + 1),$$

где $R_Я$ – активное сопротивление якоря; k_M – коэффициент момента двигателя; $T_Э$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи; $k_{ПР}$ и

$T_{ПР}$ – коэффициент усиления и постоянная времени силового преобразователя соответственно

Математическая модель системы с учётом влияния возмущающего воздействия характеризуется системой уравнений

$$X(s) = W_p(s)W_0(s) \cdot E(s) - W_F(s)W_0(s)F(s),$$
$$E(s) = G(s) - X(s).$$

где $E(s)$, $G(s)$ и $X(s)$ – изображения по Лапласу ошибки, задающего воздействия и регулируемой переменной соответственно.

Из представленной системы уравнений следует зависимость ошибки от двух воздействий: задающего и возмущающего воздействий:

$$E(s) = G(s) - W_p(s)W_0(s)E(s) + W_F(s)W_0(s)F(s)$$

Последнее уравнение можно преобразовать к виду

$$E(s) = \Phi_\varepsilon(s)G(s) + \Phi_{\varepsilon F}(s)F(s)$$

и обнаружить две передаточные функции. Передаточная функция $\Phi_\varepsilon(s)$ представляет собой передаточную функцию замкнутой системы по ошибке и определяется по формуле

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + W_p(s)W_0(s)}.$$

Передаточная функция $\Phi_{\varepsilon F}(s)$ является передаточной функцией замкнутой системы, отражающей влияние возмущающего воздействия на ошибку. Она определяется по формуле

$$\Phi_{\varepsilon F}(s) = \frac{W_F(s)W_0(s)}{1 + W_p(s)W_0(s)}.$$

В относительно низкочастотной области всегда выполняется условие

$$|W_p(j\omega)W_0(j\omega)| >> 1,$$

поэтому АФЧХ канала влияния возмущения на ошибку системы можно оценивать по формуле

$$\Phi_{\varepsilon F}(j\omega) \approx \frac{W_F(j\omega)}{W_p(j\omega)}.$$

Видно, что передаточная функция замкнутой системы в основном зависит от свойств регулятора и передаточной функции $W_F(s)$, характеризующей особенности приведения возмущения ко входу ОУ. Влияние возмущающего воздействия на ошибку уменьшается при увеличении значения амплитудно-частотной характеристики регулятора, но его возможности ограничены. Поэтому возмущающее воздействие может оказывать заметное влияние на ошибку системы.

Цель построения системы комбинированного уравнения, в которую введена компенсирующей связи по возмущающему воздействию, состоит в снижении влияния этого воздействия на ошибку системы $\varepsilon(t)$. Эта связь организуется путём измерения возмущающего воздействия и введения её на вход системы управления через корректирующее звено, обладающее передаточной функцией $W_{KF}(s)$.

Это приводит к образованию компенсирующего воздействия $u_{KF}(t)$, определяемого по закону

$$U_{KF}(s) = W_{KF}(s)F(s),$$

где $U_{KF}(s)$ – изображение по Лапласу величины $u_{KF}(t)$.

Математическое описание системы с учётом введённой компенсирующей связи по возмущающему воздействию представлено системой уравнений

$$X(s) = W_p(s)W_0(s)\cdot E(s) + W_{KF}(s)W_P(s)W_0(s)F(s) - W_F(s)W_0(s)F(s),$$
$$E(s) = G(s) - X(s).$$

Из этого описания следует уравнение

$$E(s) = G(s) - W_p(s)W_0(s)E(s) + [W_F(s) - W_{KF}(s)W_P(s)]W_0(s)F(s),$$

которое можно преобразовать к виду

$$E(s) = \Phi_{\varepsilon K}(s)G(s) + \Phi_{\varepsilon FK}(s)F(s),$$

причём

$$\Phi_{\varepsilon K}(s) = \Phi_{\varepsilon}(s) = \frac{1}{1 + W_p(s)W_0(s)},$$

$$\Phi_{\varepsilon FK}(s) = \frac{[W_F(s) - W_{FK}(s)W_P(s)]W_0(s)}{1 + W_p(s)W_0(s)}.$$

Из последнего уравнения следует, что для устранения влияния возмущающего воздействия на ошибку системы надо выбрать

$$W_{KF}(s) = \frac{W_F(s)}{W_P(s)}.$$

Тогда образуется система, инвариантная по отношению к возмущающему воздействию $F(t)$. Составляющая ошибки, обусловленная этим воздействием, всегда будет равна нулю.

Как правило, передаточная функция $W_F(s)$ имеет вид

$$W_F(s) = a(b_0 s^k + b_1 s^{k-1} + \ldots + b_{k-1}s + 1),$$

где a, b_0, …, b_{k-1}, – постоянные коэффициенты. Поэтому для компенсации возмущающего воздействия необходимы связи по воздействию и по самому этому воздействию, и по его производным от времени

$$\frac{dF}{dt}, \frac{d^2F}{dt^2}, \ldots, \frac{d^kF}{dt^k}.$$

Например, при использовании пропорционального регулятора с коэффициентом усиления k_P и объекта управления в виде двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и силового преобразователя необходима передаточная функция $W_{KF}(s)$ вида

$$W_F(s) = a(b_0 s^2 + b_1 s + 1),$$

где
$$a = \frac{R_Я}{k_M k_{ПР} k_P},$$

$$b_0 = T_Э T_{ПР},$$

$$b_1 = T_Э + T_{ПР}.$$

Очевидно, что существуют трудности в получении точной информации о возмущающем воздействии и особенно о его производных. Поэтому часто ограничиваются введением компенсирующей связи только по самому возмущающему воздействию. Тогда

$$W_{KF}(s) = a.$$

Для рассматриваемого примера системы с двигателем постоянного тока имеем

$$W_{KF}(s) = \frac{R_Я}{k_M k_{ПР} k_P}.$$

Система с такой компенсирующей связью не имеет статической ошибки, обусловленной возмущающим воздействием. Но изменяющееся во времени возмущающее воздействие приводит к появлению ошибки. Действительно, для рассматриваемого примера

$$W_F(s) - W_{FK}(s) W_P(s) = \frac{R_Я (T_Э + T_{ПР}) s}{k_M k_{ПР} k_P} \left(\frac{T_Э T_{ПР}}{T_Э + T_{ПР}} s + 1\right).$$

Отсюда следует, что в результате введения компенсирующей связи система приобрела первый порядок астатизма по отношению к возмущающему воздействию без введения в регулятор дополнительных интеграторов. Ошибка такой системы равна нулю при действии постоянного возмущения, но пропорциональна первой и второй производным возмущающего воздействия по времени.

Можно повысить точность системы, введя дополнительные компенсирующие связи, сформированные с помощью звеньев, выполняющих приближенное дифференцирование. Так для системы с двигателем постоянного тока можно предложить корректирующее звено с передаточной функцией

$$W_{KF}(s) = \frac{R_{Я}}{k_M k_{ПР} k_P} \cdot \frac{(T_Э s + 1)(T_{ПР} s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$

где

$$\max(T_1, T_2) << \min(T_Э, T_{ПР}).$$

В этом случае в полосе частот

$$0 \le \omega < \min\left(\frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}\right)$$

обеспечивается снижение влияния на ошибку системы не только возмущающего воздействия, но и его двух первых производных.

Для получения информации о возмущающем воздействии $F(t)$ используются методы непосредственного и косвенного измерения. Для непосредственного измерения используют соответствующие датчики. Например, для измерения момента внешних сил может быть установлен датчик момента.

Если используется косвенное измерение $F(t)$, то эта величина вычисляется на основании данных, получаемых от датчиков, измеряющих другие переменные системы. Например, для системы с двигателем постоянного тока момент внешних сил вычисляется с учётом момента инерции вращающихся частей $J_Д$, приведённого к валу двигателя, сигналов датчиков тока $i_Я$ и скорости вращения вала двигателя Ω по формуле

$$M_{BH} = k_M i_Я - J_Д \frac{d\Omega_Д}{dt}$$

Для определения углового ускорения применяется приближённое дифференцирование сигнала скорости, снимаемого с датчика скорости с коэффициентом передачи $k_{ДС}$. Передаточная функция звена, используемого для приближённого дифференцирования, может быть принята в виде

$$W_{ДИФ}(s)\frac{s}{T_K s+1},$$

где T_K – постоянная времени. В полосе частот

$$0 \le \omega << \frac{1}{T_K}$$

такое звено обеспечивает приемлемое качества дифференцирования.

В этом случае сигнал $u_{ВЫХ}$, содержащий информацию о результате приближённого дифференцирования скорости $\dot{\Omega}_{ВЫХ}$, может быть получен на основании уравнений

$$u_{ВЫХ} = \frac{du_1}{dt},$$

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{1}{T_K}(k_{ДС}\Omega_Д - u_1),$$

где u_1 – вспомогательная переменная. Оценка ускорения $\dot{\Omega}_{ВЫХ}$ производится по формуле $$\dot{\Omega}_{ВЫХ} = \frac{1}{k_{ДС}} u_{ВЫХ}.$$

В этом случае компенсирующее воздействие u_{KF} вычисляется в соответствии с уравнением

$$u_{KF} = k_1 u_{ДТ} - k_2 u_{ВЫХ},$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты компенсации; $u_{ДТ}$ – сигнал датчика тока. Учитывая, что датчики тока и скорости имеют коэффициенты передачи $k_{ДТ}$ и $k_{ДС}$ соответственно, для определения момента внешних сил необходимо выбирать

$$k_1 = \frac{k_M}{k_{ДТ}},$$

$$k_2 = \frac{J_Д}{k_{ДС}}.$$

Следует обратить внимание на то, что при косвенном измерении момента внешних сил в систему фактически вводятся положительная обратная связь по току и отрицательная связь по ускорению вала двигателя. Необходим анализ устойчивости полученной системы. Требования к запасам устойчивости и качеству процессов регулирования могут ограничивать допустимые значения коэффициентов k_1 и k_2, что, в свою очередь, может не позволить добиться полной компенсации влияния на ошибку даже постоянной составляющей момента внешних сил.